

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CAMILA ZONTA

**MONITORAMENTO GEODÉSICO TRIDIMENSIONAL APLICADO EM ENSAIOS
ESTRUTURAIS DE PAINÉIS COMPENSADOS DE MADEIRA**

CURITIBA

2012

CAMILA ZONTA

**MONITORAMENTO GEODÉSICO TRIDIMENSIONAL APLICADO EM ENSAIOS
ESTRUTURAIS DE PAINÉIS COMPENSADOS DE MADEIRA**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Aurélio Nadal
Coorientador: Prof. Dr. José Guilherme Prata

CURITIBA

2012

Zonta, Camila

Monitoramento geodésico tridimensional aplicado em ensaios estruturais de painéis compensados de madeira / Camila Zonta. – Curitiba, 2012.

171 f. : il., tabs, grafs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

Orientador: Carlos Aurélio Nadal

Coorientador: José Guilherme Prata

1. Compensados de madeira. 2. Madeira - Estruturas. 3. Levantamentos.
I. Nadal, Carlos Aurélio. II. Prata, José Guilherme. III. Título.

CDD 526.98


TERMO DE APROVAÇÃO

CAMILA ZONTA

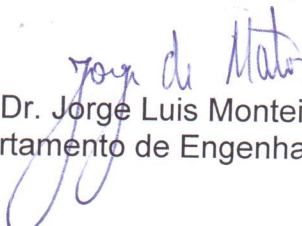
*"MONITORAMENTO GEODÉSICO TRIDIMENSIONAL APLICADO EM ENSAIOS
ESTRUTURAIS DE PAINÉIS COMPENSADOS DE MADEIRA"*

Dissertação nº 260 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

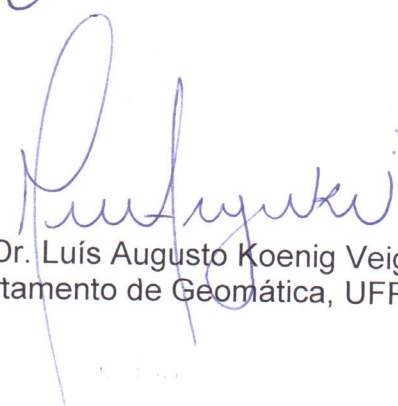
Orientador:



Prof. Dr. Carlos Aurélio Nadal
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. Jorge Luis Monteiro de Matos
Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, UFPR



Prof. Dr. Luís Augusto Koenig Veiga
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 24 de agosto de 2012.

Aos meus pais, Artemio e Salete, por serem tão especiais na minha vida.

Ao meu noivo, Daniel, pelo nosso amor.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo incentivo moral e financeiro, pelo carinho e amor.

Ao meu noivo, pela compreensão, incentivo e amor.

Ao Professor Dr. Carlos Aurélio Nadal, pela orientação, conselhos e pela amizade.

Ao Professor Dr. José Guilherme Prata, pela coorientação, conselhos e pela amizade.

Ao Professor Dr. Luís Augusto Koenig Veiga, por sua amizade e por estar sempre disposto ao diálogo.

Aos membros da banca examinadora na Qualificação: Prof. Dr. Luís Augusto Koenig Veiga e Prof. Dr. Luiz Guimarães Barbosa, pelas contribuições e sugestões para este trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro através da bolsa de estudos.

Ao Laboratório de Instrumentação Geodésica, pela disponibilidade do laboratório para realizar os primeiros experimentos e pelos equipamentos fornecidos.

Ao Laboratório de Tecnologia da Madeira, pela disponibilidade do laboratório para realizar os experimentos, pelos equipamentos e corpos de prova fornecidos.

À Rosilani Trianoski e a Mariuci Torres dos Santos, do Laboratório de Tecnologia da Madeira, que sempre me receberam muito bem e ajudaram no desenvolvimento dos experimentos.

Ao meu colega Niarkios Luiz S. S. Graça pela colaboração e ajuda no trabalho prático.

Aos colegas e amigos Andrea Tedesco, Rafael Mohl, Karina S. Silva e Miguel Muguio pela amizade, diálogo e incentivo.

RESUMO

Uma parceria entre o Laboratório de Instrumentação Geodésica e o Laboratório de Tecnologia da Madeira, ambos da Universidade Federal do Paraná, possibilitou o desenvolvimento deste projeto. A junção das áreas, Levantamento Geodésico e Tecnologia da Madeira, mostra-se um conjunto inovador na avaliação de ensaios estruturais e monitoramento de estruturas de madeira. Desta forma, realizaram-se neste trabalho ensaios de flexão estática em painéis compensados de madeira com uso de uma Máquina Universal de Ensaio e, associado a este ensaio, aplicou-se o monitoramento geodésico de pontos pré-definidos nos corpos de prova através do método de irradiação tridimensional. Para a aplicação do método geodésico utilizou-se da estação total TC2003 (Leica), sendo que os corpos de prova foram monitorados em três fases: primeira fase – corpo de prova estático; segunda fase – corpo de prova na primeira paralisação da máquina de ensaios e terceira fase – corpo de prova na segunda paralisação da máquina de ensaios. Entretanto, como a estação total TC2003 necessita de prismas ou adesivos refletivos para a realização das visadas, testaram-se a aplicabilidade dos adesivos refletivos para o monitoramento previsto. Comprovando esta aplicabilidade, puderam-se utilizar os adesivos refletivos nos pontos pré-definidos para o monitoramento nos painéis compensados. No final de cada ensaio estrutural foram analisadas as flechas de deslocamento e o módulo de elasticidade para cada corpo de prova em cada método (ensaio de flexão e método de irradiação). Como também, avaliou-se o comportamento tridimensional dos corpos de prova, desta forma, monitorando pontos nos painéis compensados que ainda não foram possíveis de serem mensurados com o ensaio estrutural convencional. A comparação das flechas entre os métodos apresentou diferenças irrelevantes, a ponto de interferir numa média de 1,56% no resultado da flecha admissível para o tipo de corpo de prova testado. Na avaliação do módulo de elasticidade, observou-se uma média de 0,67% na diferença na carga máxima admissível. Estatisticamente comprovou-se que, tanto os resultados das flechas como os resultados dos módulos de elasticidade não diferem entre os métodos. Desta forma, não acarretam alterações na análise de resistência para os painéis analisados. Na avaliação do comportamento tridimensional notou-se que, todos os corpos de prova testados apresentaram na primeira fase (estático) defeitos no que diz respeito a sua planura e sua colocação perfeitamente horizontal na máquina de ensaios. Apesar de esperar-se, baseado nas equações da mecânica, que as extremidades do painel apresentem um comportamento linear, observou-se que, durante os ensaios os corpos de prova buscam uma adaptação na distribuição das cargas. Desta forma, pôde-se confirmar que o método de irradiação tridimensional apresentou uma nova proposta de método de verificação para ensaios estruturais de madeira, incorporando ainda, uma análise tridimensional do comportamento de cada corpo de prova durante o ensaio estrutural.

Palavras-chave: Monitoramento Geodésico. Ensaio de Flexão Estática. Painéis Compensados. Deslocamento.

ABSTRACT

The association between the Laboratory of Geodetic Instrumentation and the Laboratory of Wood Technology, both from the University Federal of Paraná, enabled the development of this project. The gathering of these areas, geodetic surveys and wood technology, shows an innovative set on the evaluation of structural testing and monitoring of timber structures. Thus, in this work, there were realized bending tests on plywood panels using a Universal Testing Machine and, associated with this test, there were applied the geodetic predefined monitoring points on the specimen by the method of three-dimensional irradiation. For the application of geodetic method, it was used the TC2003 total station (Leica), being that, the plywood panels were monitored in three phases: the first phase – static test piece; the second phase – the test piece at the next stoppage of the machine testing and the third phase – the test piece at the second stoppage machine. However, as the TC2003 total station needs the prisms for the reflective stickers to the execution of the targets, there were tested the applicability of the reflective stickers for the planned monitoring. Proving this applicability, there were able to use the reflective stickers in predefined points for monitoring the plywood. After each structural test there were analyzed the maximum displacement deflection and the modulus of elasticity of each specimen on each method (bending test and irradiation method). As well, there were evaluated the three-dimensional behavior of the specimen, thus, monitoring points of plywood that were not possible to be measured with conventional structural test. The comparison of the maximum deflection between the methods showed irrelevant difference, enough to interfere with an average of 1,56% of the results in the permissible deflection of the type of the tested specimen. In the evaluation of modulus of elasticity, it was observed an average of 0,67% of the difference in the maximum permissible load. Statistically it was shown that, both the results of the maximum deflection as the results of modulus of elasticity not differ from between the methods. Thus, does not entail changes in the analysis of resistance in the panels discussed. In the three-dimensional behavior evaluation, it was noticed that, the entire test specimen showed on the first phase (static) defects regarded to its flatness and its placement on a horizontal testing machine. Although it is expected, based on the equations of mechanics, that the edges of the panel will present a linear behavior, it was observed that, during the tests the specimen seek an adaptation in the distribution of loads. Thus, it was confirmed that the method of three-dimensional irradiation presented a new proposal for a verification method for testing structural timber, incorporating also a three-dimensional analysis of the behavior of each specimen during the test structure.

Key words: Geodetic Monitoring. Static Bending Test. Plywood panels. Displacement.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	- ASPECTO DA DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA NORMAL.....	30
FIGURA 2	- FLUXOGRAMA DA INTERPRETAÇÃO DA DEFORMAÇÃO	32
FIGURA 3	- BARRAGEM LOCALIZADA NO <i>DIAMOND VALLEY LAKE</i> – <i>EUA</i> ...	37
FIGURA 4	- PONTE ESTAIADA – SÃO PAULO – BRASIL.....	38
FIGURA 5	- SISTEMA DE COORDENADAS CARTESIANAS ORTOGONAIS UTILIZADO NO MÉTODO DE IRRADIAÇÃO TRIDIMENSIONAL....	41
FIGURA 6	- ASPECTO ILUSTRATIVO DA UTILIZAÇÃO DA ESTAÇÃO TOTAL TC2003 - LEICA.....	44
FIGURA 7	- ASPECTO DE UM PRISMA REFLETOR DE VIDRO	46
FIGURA 8	- ASPECTO ILUSTRATIVO DE UMA FITA ADESIVA REFLETORA...	47
FIGURA 9	- ASPECTO DO ERRO INSTRUMENTAL DE VERTICALIDADE DO EIXO PRINCIPAL.....	49
FIGURA 10	- ASPECTO DO ERRO INSTRUMENTAL DO EIXO SECUNDÁRIO...	50
FIGURA 11	- ASPECTO DO ERRO DE ZÊNITE INSTRUMENTAL (z_0)	50
FIGURA 12	- LEITURAS DO ÂNGULO ZENITAL EM POSIÇÃO DIRETA E INVERSA DA LUNETTA	51
FIGURA 13	- ASPECTO DE UM SISTEMA LOCAL DE REFERÊNCIA	54
FIGURA 14	- ASPECTO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA NO CORPO DE PROVA MONITORADO	54
FIGURA 15	- ASPECTO DO SISTEMA DE COORDENADAS INSTRUMENTAIS..	55
FIGURA 16	- ILUSTRAÇÃO DA MONTAGEM DE UM COMPENSADO DE CINCO LÂMINAS	61
FIGURA 17	- ETAPAS DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE COMPENSADOS MULTILAMINADOS	62
FIGURA 18	- EIXOS PRINCIPAIS DA MADEIRA EM RELAÇÃO À DIREÇÃO DAS FIBRAS	63
FIGURA 19	- MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS MODELO DL 30000	68
FIGURA 20	- EXTENSÔMETROS.....	69
FIGURA 21	- DIAGRAMA TENSÃO-DEFORMAÇÃO PARA A MADEIRA	71

FIGURA 22 - ASPECTO DA INSTALAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS PARA REALIZAÇÃO DOS ESTUDOS NO LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA DA MADEIRA – ETAPA II.....	76
FIGURA 23 - ESTAÇÃO TOTAL TC2003 – LEICA	77
FIGURA 24 - ALVO FABRICADO COM FITA ADESIVA REFLETORA 3M.....	78
FIGURA 25 - ASPECTO DO PONTO DE VISADA DEFINIDO NOS ALVOS REFLETORES	79
FIGURA 26 - ASPECTO DO PRIMEIRO EXPERIMENTO PARA CALIBRAÇÃO DOS ALVOS	80
FIGURA 27 - ASPECTO DO SEGUNDO EXPERIMENTO REALIZADO COM VISADAS OBLÍQUAS	83
FIGURA 28 - ASPECTO DA DISPOSIÇÃO DOS ANTEPAROS NA VIGA	84
FIGURA 29 - ASPECTO DA DISPOSIÇÃO DOS ANTEPAROS NA VIGA	84
FIGURA 30 - ASPECTO DO EXPERIMENTO REALIZADO COM OS ANTEPAROS	85
FIGURA 31 - PAINÉIS COMPENSADOS DE PINUS.....	88
FIGURA 32 - DIMENSIONAMENTO DO CORPO DE PROVA PARA ENSAIOS DE FLEXÃO ESTATICA ESTRUTURAL.....	89
FIGURA 33 - MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS	90
FIGURA 34 - EXTENSÔMETRO	91
FIGURA 35 - ASPECTO DO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO NO LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA DA MADEIRA.....	93
FIGURA 36 - ASPECTO DOS PONTOS NO CORPO DE PROVA PARA O MONITORAMENTO GEODÉSICO TRIDIMENSIONAL.....	93
FIGURA 37 - ASPECTO DA ESTAÇÃO TOTAL ESTACIONADA NO LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA DA MADEIRA.....	94
FIGURA 38 - ASPECTO DOS PONTOS DE APOIO NO LABORATÓRIO.....	95
FIGURA 39 - ASPECTO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA NO CORPO DE PROVA APÓS UMA TRANSLAÇÃO E DUAS ROTAÇÕES.....	98
FIGURA 40 - ASPECTO DO EXTENSÔMETRO APOIADO ATRAVÉS DO DISPOSITIVO YOKE	99
FIGURA 41 - ASPECTO DOS ADESIVOS REFLETORES FIXADOS NOS PREGOS	100

FIGURA 42	- LOCALIZAÇÃO DA LINHA ELÁSTICA NO MEIO DO VÃO CENTRAL PARA OBTENÇÃO DA DEFORMAÇÃO (FLECHA) ATRAVÉS DO ENSAIO ESTRUTURAL.....	102
FIGURA 43	- LOCALIZAÇÃO DO VÃO CENTRAL (PONTOS P2, P3 E P4) PARA OBTENÇÃO DO DESLOCAMENTO ATRAVÉS DO MÉTODO DE IRRADIAÇÃO.....	103
FIGURA 44	- ASPECTO DO DESLOCAMENTO INICIAL NO VÃO CENTRAL DO CORPO DE PROVA	103
FIGURA 45	- ASPECTO DO DESLOCAMENTO DA LINHA ELÁSTICA NA PRIMEIRA PARADA DA MÁQUINA DE ENSAIOS.....	104
FIGURA 46	- ASPECTO DO DESLOCAMENTO DA LINHA ELÁSTICA NA SEGUNDA PARADA DA MÁQUINA DE ENSAIOS	105
FIGURA 47	- ASPECTO DA DISPOSIÇÃO DOS ANTEPAROS NA VIGA	113
FIGURA 48	- ASPECTO DA SEQUÊNCIA DO ENSAIO REALIZADO.....	118
FIGURA 49	- MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 1: ESTADO ESTÁTICO (PRIMEIRA FASE)	128
FIGURA 50	- MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 1: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE).....	128
FIGURA 51	- ISODESLOCAMENTOS DO CORPO DE PROVA 1: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE).....	129
FIGURA 52	- MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 1: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE).....	130
FIGURA 53	- ISODESLOCAMENTOS DO CORPO DE PROVA 1: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE).....	130
FIGURA 54	- MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 2: ESTADO ESTÁTICO (PRIMEIRA FASE)	131
FIGURA 55	- MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 2: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE).....	132
FIGURA 56	- ISODESLOCAMENTOS DO CORPO DE PROVA 2: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE).....	133
FIGURA 57	- MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 2: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE).....	134
FIGURA 58	- ISODESLOCAMENTOS DO CORPO DE PROVA 2: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE).....	134
FIGURA 59	- MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 3: ESTADO ESTÁTICO (PRIMEIRA FASE)	135

FIGURA 60	- MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 3: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE).....	136
FIGURA 61	- ISODESLOCAMENTOS DO CORPO DE PROVA 3: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE).....	137
FIGURA 62	- MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 3: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE).....	138
FIGURA 63	- MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 3: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE).....	138
FIGURA 64	- MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 4: ESTADO ESTÁTICO (PRIMEIRA FASE)	140
FIGURA 65	- MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 4: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE).....	140
FIGURA 66	- ISODESLOCAMENTOS DO CORPO DE PROVA 4: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE).....	141
FIGURA 67	- MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 4: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE).....	142
FIGURA 68	- ISODESLOCAMENTOS DO CORPO DE PROVA 4: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE).....	142
FIGURA 69	- MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 5: ESTADO ESTÁTICO (PRIMEIRA FASE)	144
FIGURA 70	- MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 5: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE).....	144
FIGURA 71	- ISODESLOCAMENTOS DO CORPO DE PROVA 5: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE).....	145
FIGURA 72	- MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 5: SEGUNDA PARADA (TERCIEIRA FASE).....	146
FIGURA 73	- ISODESLOCAMENTOS DO CORPO DE PROVA 5: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE).....	146
FIGURA 74	- MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 6: ESTADO ESTÁTICO (PRIMEIRA FASE)	148
FIGURA 75	- MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 6: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE).....	148
FIGURA 76	- ISODESLOCAMENTOS DO CORPO DE PROVA 6: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE).....	149
FIGURA 77	- MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 6: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE).....	150

FIGURA 78 - ISODESLOCAMENTOS DO CORPO DE PROVA 6: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE).....	150
FIGURA 79 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 7: ESTADO ESTÁTICO (PRIMEIRA FASE)	152
FIGURA 80 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 7: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE).....	152
FIGURA 81 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 7: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE).....	153
FIGURA 82 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 7: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE).....	154
FIGURA 83 - ISODESLOCAMENTOS DO CORPO DE PROVA 7: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE).....	154
FIGURA 84 - ASPECTO DE UM CORPO DE PROVA LEVADO À RUPTURA.....	155
FIGURA 85 - ASPECTO DE UM CORPO DE PROVA LEVADO À RUPTURA.....	156
FIGURA 86 - ASPECTOS DOS CORPOS DE PROVA LEVADOS À RUPTURA .	156

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1	- CLASSIFICAÇÃO DAS ESTAÇÕES TOTAIS SEGUNDO SUAS PRECISÕES	44
QUADRO 2	- CLASSIFICAÇÃO DO AMBIENTE DE USO DOS PAINÉIS DE MADEIRA CONFORME O TIPO DE ADESIVO	59
QUADRO 3	- DIMENSIONAMENTO DOS CORPOS DE PROVA DE COMPENSADOS PARA ENSAIOS ESTRUTURAIS	89
QUADRO 4	- COORDENADAS DOS ALVOS NA PRIMEIRA LEITURA	109
QUADRO 5	- COORDENADAS DOS ALVOS NA SEGUNDA LEITURA	110
QUADRO 6	- COORDENADAS DOS ALVOS NA TERCEIRA LEITURA	110
QUADRO 7	- DISTÂNCIA ESPACIAL ENTRE OS PONTOS MENSURADA COM A ESTAÇÃO TOTAL	110
QUADRO 8	- DISTÂNCIA ENTRE OS PONTOS MENSURADA COM O PAQUÍMETRO	111
QUADRO 9	- RESULTADO DO TESTE ESTATÍSTICO PARA O PRIMEIRO EXPERIMENTO	111
QUADRO 10	- COORDENADAS DOS ALVOS NA PRIMEIRA LEITURA	113
QUADRO 11	- COORDENADAS DOS ALVOS NA SEGUNDA LEITURA	114
QUADRO 12	- COORDENADAS DOS ALVOS NA TERCEIRA LEITURA	114
QUADRO 13	- VETOR DIFERENÇA DOS PONTOS ENTRE AS SÉRIES DE OBSERVAÇÕES	114
QUADRO 14	- COORDENADAS DOS PONTOS MONITORADOS E SUAS RESPECTIVAS MÉDIAS E DESVIOS PADRÃO	115
QUADRO 15	- RESULTADOS DOS CORPOS DE PROVA TESTADOS DE ACORDO COM OS MOMENTOS PRÉ-DETERMINADOS DE PARALISAÇÃO DA MÁQUINA DE ENSAIOS (MENSURADOS COM O EXTENSÔMETRO)	117
QUADRO 16	- RESULTADOS DO ENSAIO ESTRUTURAL PARA CADA CORPO DE PROVA TESTADO DE ACORDO COM O MÉTODO DE IRRADIAÇÃO	119
QUADRO 17	- RESULTADOS DO ENSAIO ESTRUTURAL PARA CADA CORPO DE PROVA TESTADO DE ACORDO COM O MÉTODO DE IRRADIAÇÃO	120
QUADRO 18	- RESULTADOS DAS FLECHAS PARA CADA MÉTODO	122

QUADRO 19	- RESULTADO DO TESTE ESTATÍSTICO PARA A COMPARAÇÃO DAS FLECHAS ENTRE OS MÉTODOS.....	123
QUADRO 20	- RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA AMBOS OS MÉTODOS.....	125
QUADRO 21	- RESULTADO DO TESTE ESTATÍSTICO PARA A COMPARAÇÃO DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE ENTRE OS MÉTODOS.....	126
QUADRO 22	- DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA SEGUNDA FASE.....	129
QUADRO 23	- DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA TERCEIRA FASE.....	131
QUADRO 24	- DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA SEGUNDA FASE.....	133
QUADRO 25	- DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA TERCEIRA FASE.....	135
QUADRO 26	- DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA SEGUNDA FASE.....	137
QUADRO 27	- DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA TERCEIRA FASE.....	139
QUADRO 28	- DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA SEGUNDA FASE.....	141
QUADRO 29	- DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA TERCEIRA FASE.....	143
QUADRO 30	- DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA SEGUNDA FASE.....	145
QUADRO 31	- DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA TERCEIRA FASE.....	147
QUADRO 32	- DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA SEGUNDA FASE.....	149
QUADRO 33	- DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA TERCEIRA FASE.....	151
QUADRO 34	- DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA SEGUNDA FASE.....	153
QUADRO 35	- DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA TERCEIRA FASE.....	155

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- área
A_z	- azimute
b	- largura
c	- centro do instrumento
d_f	- discrepância entre as flechas
D	- distância espacial
D_i	- distância inclinada
E	- módulo de elasticidade
f	- flecha de deformação e/ou deslocamento
f_{adm}	- flecha máxima admissível
f_E	- flecha máxima ou deformação, mensurado com o extensômetro
f_I	- flecha máxima ou deslocamento, mensurado com a estação total (método de irradiação)
F	- força
F_{adm}	- força admissível
F_{rup}	- força de ruptura
FS	- fator de segurança
F_1	- 10% da força máxima
F_2	- 40% da força máxima
h	- altura
h_i	- altura do instrumento
h_s	- altura do prisma ou alvo
H_0	- hipótese nula
H_1	- hipótese alternativa
i	- eixo mecânico de rotação da luneta
I	- momento de inércia
L	- comprimento
$L1$	- vão de medição da deformação e/ou deslocamento
$L2$	- distância entre os apoios e a aplicação de carga

$L3$	- distância entre os pontos de aplicações de carga
M	- momento fletor
MOE	- módulo de elasticidade adaptado ao trabalho proposto
n_1	- número de observações da primeira amostra
n_2	- número de observações da segunda amostra
p_i	- peso inicial
p_s	- peso da madeira seca
P	- ponto
PD	- posição direta da luneta
PI	- posição inversa da luneta
$R_1(\theta)$	- rotação em torno do eixo X
$R_3(\gamma)$	- rotação em torno do eixo Z
S_1^2	- variância da primeira amostra
S_2^2	- variância da segunda amostra
t_{CAL}	- valor calculado da variável t
t_{TAB}	- valor tabelado da variável t
T	- tolerância
U	- teor de umidade
\bar{x}	- média
\bar{x}_1	- média para a primeira população ou amostra
\bar{x}_2	- média para a segunda população ou amostra
Z	- ângulo zenital
Z_0	- erro de zênite instrumental
α	- nível de significância
δ	- deslocamento
$\delta_{L1(f)}$	- deslocamento final (segunda parada) no vão central
$\delta_{L1(i)}$	- deslocamento inicial (primeira parada) no vão central
$\delta_{P2(f)}$	- deslocamento final (segunda parada) no ponto P2
$\delta_{P2(i)}$	- deslocamento inicial (primeira parada) no ponto P2
$\delta_{P3(f)}$	- deslocamento final (segunda parada) no ponto P3

$\delta_{P3(i)}$	- deslocamento inicial (primeira parada) no ponto P3
$\delta_{P4(f)}$	- deslocamento final (segunda parada) no ponto P4.
$\delta_{P4(i)}$	- deslocamento inicial (primeira parada) no ponto P4.
δ_1	- deslocamento da linha elástica na primeira paralisação da máquina de ensaios
δ_2	- deslocamento da linha elástica na segunda paralisação da máquina de ensaios
ΔA	- componente da área
ΔN	- componente da força na direção normal
ΔF	- componente da força/carga aplicada
ΔT	- componente da força na direção tangencial
$\Delta \delta$	- componente de deformação e/ou deslocamento
ε	- deformação
ε_c	- deformação específica por cisalhamento
ε_{cmed}	- deformação específica média por cisalhamento
ε_n	- deformação axial
ε_{nmed}	- deformação específica axial média
ε_p	- deformação prevista
ε_1	- deformação correspondente a 10% da força máxima
ε_2	- deformação correspondente a 40% da força máxima
ρ	- raio de curvatura
σ	- tensão normal
σ_e	- tensão de elasticidade
σ_{lp}	- limite superior da tensão ou limite de proporcionalidade
σ_{rup}	- tensão de ruptura
σ	- desvio padrão
σ_a	- desvio padrão angular
σ_c	- desvio padrão comum
τ	- tensão tangencial
φ	- número de graus de liberdade da soma das duas médias populacionais

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 JUSTIFICATIVA	20
1.2 OBJETIVOS	22
1.2.1 Objetivo geral	22
1.2.2 Objetivos específicos	22
2 REVISÃO DE LITERATURA	24
2.1 COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS	24
2.1.1 Deslocamento de estruturas	26
2.1.2 Deformação de estruturas	29
2.2 MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS	33
2.2.1 Métodos geodésicos para monitoramento	36
2.2.1.1 Método de irradiação tridimensional	41
2.2.1.1.1 Modelo matemático funcional para coordenadas topográficas tridimensionais	41
2.2.1.2 Estação total	43
2.2.1.3 Erros de observação	47
2.2.1.3.1 Erros instrumentais	48
2.2.1.4 Sistema local de referência	53
2.2.1.4.1 Sistemas de coordenadas instrumentais	55
2.3 SETOR FLORESTAL MADEIREIRO	56
2.3.1 Painéis de madeira	58
2.3.1.1 Painel compensado multilaminado	60
2.3.1.1.1 Processo de fabricação	61
2.3.2 Propriedades físicas e mecânicas da madeira	62
2.3.2.1 Propriedades físicas da madeira	62
2.3.2.2 Propriedades mecânicas da madeira	66
2.3.2.2.1 Ensaio de tração e compressão	68
2.3.2.2.2 Diagrama tensão-deformação	69
2.3.2.2.2.1 Módulo de elasticidade	70
2.3.3 Ensaaios não destrutivos	72
3 MATERIAIS E MÉTODOS	75
3.1 ETAPA I - VERIFICAÇÃO E ANÁLISE DA EFICÁCIA DOS ADESIVOS REFLETORES E DA ESTAÇÃO TOTAL	76
3.1.1 Definição do equipamento	77
3.1.2 Primeiro experimento: calibração dos alvos	79
3.1.3 Segundo experimento: verificação dos alvos refletores para utilização em visadas oblíquas	83
3.2 PARTE II – ENSAIOS DE FLEXÃO ESTÁTICA E MONITORAMENTO GEODÉSICO DE PAINÉIS COMPENSADOS DE MADEIRA	86
3.2.1 Local do trabalho	86
3.2.2 Definição do material e do ensaio estrutural	87
3.2.3 Ensaio estrutural	88
3.2.3.1 Determinação do módulo de elasticidade (E) à flexão estática adaptada da norma europeia EN 789 (CEN, 2004)	91

3.2.4 Método de irradiação tridimensional.....	92
3.2.5 Ensaio de flexão estática e método de irradiação tridimensional	98
3.2.5.1 Comparação dos métodos	102
3.2.5.1.1 Análise estatística da flecha máxima.....	106
3.2.5.1.2 Análise estatística do módulo de elasticidade	107
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	109
4.1 PARTE I.....	109
4.1.1 Primeiro experimento: calibração dos alvos	109
4.1.2 Segundo experimento: verificação dos alvos refletores para utilização em visadas oblíquas.....	112
4.2 ETAPA II.....	116
4.2.1 Ensaio de flexão estática.....	117
4.2.2 Método de irradiação tridimensional.....	118
4.2.3 Comparação dos resultados.....	120
4.2.4 Comportamento tridimensional dos corpos de prova	127
4.2.4.1 Corpo de prova 1	127
4.2.4.2 Corpo de prova 2.....	131
4.2.4.3 Corpo de prova 3.....	112
4.2.4.4 Corpo de prova 4.....	112
4.2.4.5 Corpo de prova 5.....	143
4.2.4.6 Corpo de prova 6.....	112
4.2.4.7 Corpo de prova 7.....	112
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	157
REFERÊNCIAS.....	159
ANEXOS	165

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento de estruturas tem se mostrado, nas últimas décadas, como uma das etapas indispensáveis ao desenvolvimento de uma obra de engenharia. Tanto por questões de verificação e validação de parâmetros e constantes utilizadas nos cálculos de dimensionamento da obra, como em questões de segurança, principalmente as que envolvem o colapso de parte ou de toda a estrutura, quanto por questões de aprimoramentos, melhoras no dimensionamento e custos.

Para o dimensionamento ou verificação de um projeto de engenharia, são necessários conhecimentos dos princípios da Mecânica dos Materiais ou Resistência dos Materiais para determinar os esforços e reações que agem sobre os vários elementos estruturais. Entretanto, é relevante salientar a importância do tamanho e formato da estrutura, pois esses devem ser priorizados de forma que as tensões sejam mantidas abaixo de um valor limite, fixado em norma técnica, para o tipo de material do qual a estrutura foi ou será construída.

O aprimoramento da Construção Civil tem permitido a diminuição das dimensões das peças que compõem uma estrutura e maior liberdade na concepção de formas geométricas envolvidas, além de buscar soluções por aplicações destas estruturas e a combinação de diferentes materiais. Dentre esses materiais, encontra-se a madeira, a qual, industrializada, apresenta características que favorecem sua aplicabilidade em estruturas e acabamentos na construção civil.

Desde as civilizações primitivas até hoje, a madeira sempre esteve presente na construção civil e, com certeza, é um dos mais importantes materiais utilizados pelo homem. Entretanto, a grande exploração das florestas nativas instigou a implantação de reflorestamentos para atender à demanda. Estes reflorestamentos diferenciam-se em função do produto final que se almeja, vinculado às características de crescimento e manejo silvicultural aplicado.

Com o desenvolvimento da indústria madeireira, paralelamente ao da construção civil, tem aumentado o interesse e a importância de aplicações de novas metodologias para testar uma maior aplicabilidade de produtos madeireiros nos projetos de engenharia. Um destes aprimoramentos tem sido possível com a

utilização de métodos geodésicos que se utilizam de instrumentos precisos, como a Estação Total. Este equipamento é utilizado, principalmente, para levantamentos topográficos e locação na engenharia, construções e monitoramentos de estruturas.

Utilizando-se das técnicas associadas a este equipamento e dos métodos aplicáveis ao monitoramento de estruturas, desenvolveu-se este trabalho. Ou seja, as técnicas geodésicas destinadas à mensuração de grandezas como direções horizontais, ângulos verticais e distâncias, e os métodos escolhidos e utilizados para a determinação das coordenadas de pontos de interesse. Desta forma, optou-se em realizar Ensaios Destrutivos e Não Destrutivos de painéis compensados de madeira com uso da Máquina Universal de Ensaios, incorporando juntamente um monitoramento do deslocamento dos mesmos com auxílio de métodos geodésicos tridimensionais. A importância de se desenvolver ambos os ensaios está na verificação, no caso destrutivo, dos resultados evidenciados pelos métodos consagrados utilizados na análise estrutural da madeira, e no caso não destrutivo, se as características mecânicas e dimensionais realmente não se alteram no decorrer dos ensaios. Pretende-se, dessa forma, verificar se a metodologia realizada com a estação total é eficaz para os tipos de ensaios realizados, a ponto de ser mais uma proposta de método de verificação para ensaios estruturais de madeira.

1.1 JUSTIFICATIVA

O comportamento de corpos sujeitos a forças externas depende das leis fundamentais da mecânica, das características físicas e químicas que compõem o corpo e dos estudos viabilizados pela resistência dos materiais. Informações destas características são determinadas em laboratório, onde os materiais são testados mediante cargas aplicadas e controladas tendo, desta forma, uma análise do comportamento visando a detecção de deformações, deslocamentos, rompimentos e outros. Possibilitando, assim, a aplicação dos corpos ou estruturas testadas em situações reais, mediante a garantia da qualidade e resistência física e mecânica dos mesmos.

Na grande maioria dos ensaios estruturais realizados com a madeira são empregadas metodologias mediante as normas técnicas do material específico estudado. No caso deste trabalho, os procedimentos são realizados segundo as Normas Europeias (*European Committee For Standardization*) para o caso específico de determinação das propriedades mecânicas de painéis compensados de madeira com a Máquina Universal de Ensaios.

Entretanto, o monitoramento da qualidade dos produtos madeireiros, utilizando-se métodos tradicionais para a determinação das propriedades da madeira, são lentos e destrutivos. Com o advento dos métodos não destrutivos, como ultra-som, vibrações, dentre outros, estes tornaram-se uma alternativa rápida para avaliação de características químicas, físicas e mecânicas da madeira.

Desta forma, estuda-se a implantação de métodos geodésicos para o acompanhamento destes ensaios destrutivos tradicionais, analisando-se e comparando-se a eficácia dos mesmos, como também se verifica a possibilidade de utilizar os métodos geodésicos para o monitoramento da qualidade dos produtos madeireiros em ensaios não destrutivos, propondo ser um método disponível para este tipo de avaliação.

Por meio dos ensaios estruturais convencionais, ainda não é possível obter uma resposta para o comportamento de todo o corpo de prova. Para a caracterização mecânica tradicional, ao final dos ensaios de flexão estática estrutural, tem-se o deslocamento da linha elástica no meio do vão de medição de deformação, ou seja, a flecha máxima do corpo de prova. Assim, utilizando-se dos métodos e técnicas geodésicas será possível implantar uma avaliação em conjunto com a realizada nos ensaios da área madeireira, obtendo-se um resultado mais detalhado do comportamento do corpo de prova. Este comportamento, até então, não mensurado nos ensaios tradicionais da área madeireira, apresentará novas possibilidades de avaliações aos corpos de prova durante os experimentos.

A grande maioria dos trabalhos científicos realizados com aplicação do monitoramento de estruturas com uso de métodos geodésicos tem empregado estudos de caso em estruturas de concreto. Pensando-se na possibilidade de se trabalhar com estruturas de madeira propõe-se este trabalho.

A comparação entre um estudo teórico, o resultado da máquina universal de ensaios e os obtidos por métodos geodésicos e a verificação de suas efetivas

precisões serão mostradas neste trabalho. Ao se avaliar o desempenho dos métodos, das técnicas e dos instrumentos será possível a proposição deste método para aplicação de monitoramentos de estruturas de madeira sob carregamentos reais.

Desta forma, este trabalho pretende contribuir tanto para pesquisas e estudos voltados ao monitoramento de estruturas de madeira com aplicação de métodos geodésicos, como também, voltados à análise estrutural de painéis de madeira para a área Florestal.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar as possibilidades de aplicação de métodos geodésicos em monitoramentos de ensaios de painéis compensados estruturais, sendo eles destrutivo ou não destrutivo, em laboratório.

1.2.2 Objetivos específicos

- Verificar e analisar a eficácia dos adesivos refletor e da Estação Total TC2003 (LEICA) para o trabalho pretendido;
- Comparar os deslocamentos dos painéis compensados estruturais através do método tridimensional por irradiação, mediante os pontos de monitoramento pré – estabelecidos e cargas aplicadas, com o ensaio de

flexão estática realizado através de uma Máquina Universal de Ensaio segundo a EN 789¹ (CEN, 2004);

- Analisar se o método geodésico apresenta resultados satisfatórios no monitoramento dos painéis compensados de madeira, a ponto de ser mais uma proposta de método de verificação para ensaios destrutivos ou não destrutivos;
- Avaliar o comportamento estrutural dos painéis compensados com os resultados obtidos com a estação total, verificando se os mesmos apresentam respostas condizentes com o esperado;
- Investigar se o desempenho do instrumento e do método geodésico permitirá a proposição desta metodologia para aplicação de monitoramentos com estruturas de madeira sob carregamentos reais.

¹ *EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION* – CEN. **EN 789**: estruturas de madeira – métodos de teste – determinação das propriedades mecânicas de painéis derivados de madeira. *Brussels*, 2004.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS

Em um projeto de qualquer estrutura, em primeiro lugar, é necessário utilizar os princípios da mecânica (estática e dinâmica) para determinar as forças que agem sobre os vários elementos estruturais. Para o dimensionamento ou verificação de um projeto, o Engenheiro necessita conhecer os esforços e as reações na estrutura.

Entretanto, é relevante salientar a importância do tamanho e formato da estrutura, esses devem ser priorizados de forma que as tensões sejam mantidas abaixo de um valor limite para o tipo de material do qual a estrutura foi projetada ou será executada. Porém, não é possível calcular o valor dos esforços em cada ponto de uma estrutura, utilizando-se então, a chamada tensão, juntamente com critérios de resistência. Segundo Hibbeler (2010, p. 16), a tensão é definida como a intensidade das forças distribuídas em um corpo, ou ainda, uma grandeza física definida pelas forças atuantes em uma superfície e na área desta superfície:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (01)$$

onde:

σ : Tensão (N/m² ou Pa);

F : Módulo da força axial aplicada sobre a seção (N - Newton), e

A : Área da seção (m²).

Pode-se decompor esta grandeza física em componente perpendicular (normal) e paralela (cisalhante ou tangencial) a seção de interesse:

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta A} = \frac{dN}{dA} \quad (02)$$

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} = \frac{dT}{dA} \quad (03)$$

onde:

σ : Tensão normal;

τ : Tensão tangencial;

ΔN : Componente da força na direção normal;

ΔT : Componente da força na direção tangencial, e

ΔA : Componente da área.

Por convenção as tensões positivas indicam tensões de tração, ao passo que, as tensões negativas indicam tensões de compressão.

Segundo Hibbeler (2010, p. 33), para especificação da carga admissível para um projeto ou análise de um elemento utiliza-se o denominado fator de segurança (FS). Este fator é numérico, apresentado pela razão entre a carga de ruptura (F_{rup}) e a carga admissível (F_{adm}). A partir desta análise é possível avaliar se o fator de segurança será válido para a utilização do elemento em condições semelhantes de carga e geometria. Segundo o mesmo autor, o valor específico deste fator pode variar de acordo com o tipo de material utilizado e a finalidade pretendida da estrutura. Todavia, há normas de projeto e manuais de engenharia que fornecem padrões de fatores de segurança, mantendo um equilíbrio entre garantir a segurança das pessoas e do ambiente, oferecendo soluções de projetos econômicos.

Assim, inicia-se uma análise comportamental de uma estrutura, de modo a garantir a segurança para um projeto. Entretanto, ao longo de um dimensionamento estrutural ou mesmo de um monitoramento estrutural, outros problemas podem surgir como vibrações, impactos, cargas acidentais, deterioração, desgaste provocado por exposição a intempéries, dentre outros. Mediante a qualquer uma destas condições as propriedades mecânicas de alguns materiais, como a madeira

ou o concreto, por exemplo, podem apresentar alta variabilidade, desde um deslocamento, uma deformação ou até mesmo uma ruptura.

2.1.1 Deslocamento de estruturas

Sob a ação de um sistema de cargas aplicado a um elemento estrutural, pontos individuais do corpo podem se deslocar. Esse movimento de um ponto com relação a um sistema de referência é definido como uma grandeza vetorial denominada deslocamento.

Há casos, em que, os deslocamentos são associados a uma translação e/ou rotação do corpo como um todo, sendo que, nem o tamanho nem a forma são afetados. Segundo Morris *et al.* (1999, p. 94), o estudo dos deslocamentos desses casos, fazem parte da Mecânica dos Corpos Rígidos.

Todavia, é relevante antes de maiores considerações sobre deslocamento, dar ênfase a Linha Elástica de uma estrutura em estudo. Visto que, segundo Assan (2010, p.361), ao se projetar uma estrutura deve-se garantir que os elementos estruturais que a compõem não tenham deformações e/ou deslocamentos excessivos, além de resistir às ações a que estão submetidos. Por exemplo, no caso de uma viga, define-se como linha elástica a curvatura (inicialmente retilínea) do eixo longitudinal que passa pelo centróide de cada área da seção transversal da viga. Ou ainda, segundo Assan (2010, p. 361), define-se linha elástica a curva que o eixo baricêntrico de uma barra forma após ter-se deformado. Esse deslocamento na componente vertical é denominado de flecha ou deflexão, e as normas técnicas especificam os valores máximos que podem alcançar de acordo com os diversos elementos estruturais.

A formação da linha elástica depende da inclinação ou do deslocamento restringidos pelos diversos tipos de apoio, sendo sua forma determinada por meio do diagrama de momento. Os momentos positivos resultam em uma linha elástica côncava para cima e os negativos em uma linha elástica côncava para baixo. Em geral, os apoios que resistem a uma força (como um pino) restringem o deslocamento, e os apoios que resistem a um momento (como uma parede fixa)

restringem a rotação ou a inclinação, bem como o deslocamento (HIBBELER, 2010, p. 421)

Para análise da linha elástica torna-se importante relacionar o momento fletor (M) da força aplicada e o raio de curvatura (ρ) da viga deformada:

$$M = \frac{E \cdot I}{\rho} \quad (04)$$

onde:

M : Momento Fletor interno na viga no ponto onde ρ deve ser determinado;

ρ : Raio de curvatura em um ponto específico sobre a curva da linha elástica;

E : Módulo de Elasticidade do material, e

I : Momento de Inércia calculado em torno do eixo neutro.

Sendo que, o módulo de elasticidade para ensaios em vigas biapoeadas, por exemplo, seguem a EQUAÇÃO (05):

$$E = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot f \cdot I} \quad (05)$$

onde:

F : Carga/força aplicada;

L : Vão de medição da deformação;

f : Flecha (deformação e/ou deslocamento), e

I : Momento de Inércia.

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (06)$$

onde:

I : Momento de Inércia (neste caso, seções retangulares ou quadradas);

b : Largura da viga, e

h : Altura da viga.

Entretanto, se várias cargas agirem sobre o elemento estrutural, deve-se determinar funções de momento separadas entre cada uma delas. O produto EI na EQUAÇÃO (04) é denominado rigidez à flexão e sempre representa uma quantidade positiva. Porém, o sinal do raio de curvatura em um ponto específico sobre a curva da linha elástica (ρ) depende da direção do momento.

Segundo Assan (2010, p. 55), é impossível fisicamente ter uma força aplicada em um ponto, há sempre uma área ou um volume sobre o qual se distribui a força. Porém, quando essa área é muito pequena, se comparada com a área total do sólido onde atua a força, pode ser considerada como um ponto. Desta forma, para fins de cálculos de esforços nas estruturas, é necessário considerar como as cargas atuam nos diversos elementos estruturais. Segundo Assan (2010, p. 87), as cargas podem ser concentradas, quando atuam sobre uma superfície muito pequena, ou ainda, podem ser distribuídas, quando agem ao longo de uma linha ou sobre uma superfície.

Para ocorrer à mudança do corpo de uma posição de equilíbrio para outra posição de equilíbrio são necessários dois tipos de movimentos: rotação e translação. Estes movimentos, ou deslocamentos, são denominados graus de mobilidade (ou graus de liberdade) do corpo no plano (ASSAN, 2010, p. 94). Ou seja, são movimentos de corpo rígido, e cada movimento impedido corresponde à perda de um grau de mobilidade.

As estruturas são fixadas no solo ou em outras estruturas justamente para evitar os movimentos de corpo rígido. Segundo Assan (2010, p.95), as estruturas não poderiam sofrer este tipo de movimento, porém se os tivessem, não estariam em equilíbrio. Entretanto, pontos da estrutura podem se mover, mas para que isso ocorra, ela tem de se deformar.

A importância de se dimensionar, por exemplo, uma viga, está na determinação do valor de seu deslocamento transversal para certa carga aplicada. Desta forma, o fato de não restringir os deslocamentos verticais das vigas dentro de limites adequados, acarreta na Construção Civil em frequentes aparecimentos de

rachaduras em paredes, em forros, dentre outros. Estes deslocamentos dependem da rigidez do material, de suas dimensões, das cargas aplicadas e dos apoios.

Há métodos para calcular estes deslocamentos transversais, dos quais são muito utilizados, tais como: método da integração, método das funções singulares, método da superposição e método de energia. Para maiores informações desses métodos, recomenda-se MORRIS *et al.* (1999) e HIBBELER (2010).

2.1.2 Deformação de estruturas

Segundo a mecânica dos materiais, da qual trata do equilíbrio dos corpos analisando os efeitos internos provocados por forças externas, nenhum corpo é perfeitamente rígido²: fios sujeitos a força de tração se alongarão, vigas que suportam cargas irão curvar-se, eixos sujeitos a torques ficarão torcidos, dentre outros. Desta forma, é importante desenvolver as relações entre as cargas aplicadas a um corpo deformável e a deformação do corpo (MORRIS *et al.*, 1999, p. 20).

Sob a ação de forças (forças do corpo ou forças da superfície), um corpo deformável sofre alterações, gradualmente ou subitamente, em sua forma e posição (CHEN, 1983, p. 15). A determinação e interpretação destas alterações são o principal objetivo dos estudos da deformação. Quanto as subdivisões da deformação de um corpo deformável Morris *et al.* (1999, p. 94-95) explica as diferenças, a saber:

- a) Deformação Específica: (deformação por unidade de comprimento) é uma quantidade usada para medir a intensidade de uma deformação, da mesma forma que a tensão (força por unidade de área) é usada para medir a intensidade de uma força interna. Subdividida em: Deformação Específica Normal (ε) – mede a mudança no tamanho (alongamento ou encurtamento de um segmento linear arbitrário) de um corpo durante a deformação; Deformação Específica por Cisalhamento (ε_c) – mede a mudança na forma (variação angular entre duas linhas ortogonais no estado indeformado) de um corpo durante a deformação.
- b) Deformação Específica Axial Média: pode-se usar a mudança no comprimento (ou largura) de uma barra simples submetida a uma carga

² Defini-se corpo rígido como aquele em que a posição relativa de seus pontos não se modifica após o corpo sofrer um deslocamento (ASSAN, 2010, p. 53).

axial (FIGURA 1) para ilustrar a ideia de uma deformação específica normal. Obtém-se a deformação específica axial média (ε_{nmed}) do comprimento da barra dividindo a deformação axial (ε_n) pelo comprimento original da barra (L):

$$\varepsilon_{nmed} = \frac{\varepsilon_n}{L} \quad (07)$$

- c) Deformação Específica Axial em um Ponto: pode ser determinada fazendo-se cada vez menor o comprimento sobre o qual a deformação axial é medida. No limite, quando $\Delta L \rightarrow 0$, obtém-se a quantidade definida como a deformação específica axial num ponto qualquer (EQUAÇÃO 08):

$$\varepsilon_{(P)} = \lim_{\Delta L \rightarrow 0} \frac{\Delta \varepsilon_n}{\Delta L} = \frac{d\varepsilon_n}{dL} \quad (08)$$

- d) Deformação Específica por Cisalhamento: obtém-se uma deformação específica média por cisalhamento, (ε_{cmed}), dividindo-se a deformação (ε), em uma direção normal ao cisalhamento pelo comprimento (L).

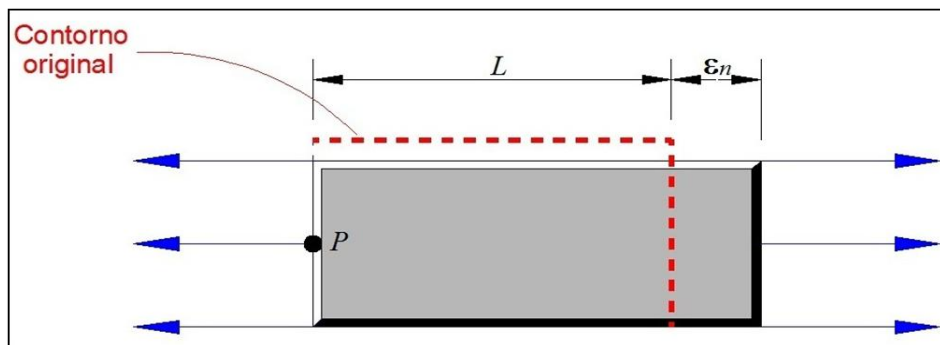


FIGURA 1 - ASPECTO DA DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA NORMAL
FONTE: Adaptado de MORRIS *et al.* (1999, p. 95).

Analisando-se as definições apresentadas, percebe-se que a relação entre a carga e a deformação depende das dimensões dos elementos e do tipo de material do qual são feitos.

A mecânica dos materiais enfoca a ação de forças externas a um corpo ou a uma estrutura estando sujeito a deslocamentos e deformações de diversas naturezas. Este mesmo enfoque pode ser aplicado às estruturas de maior proporção, como é realizado dentro das áreas da Geodésia e da Geodinâmica.

Mediante a isso, segundo Whitten³ (1982) *apud* Chen (1983, p. 03) as deformações podem ser classificadas como sendo de escala local, regional, continental ou global, dependendo da sua extensão. Deformações locais podem incluir aquelas que ocorrem em estruturas feitas pelo homem, ou por ele modificadas, como áreas de extração de água, minérios, dentre outros. O monitoramento de deformações devido ao atrito provocado pelo movimento entre placas tectônicas, ou aos movimentos de terremotos são exemplos de deformações regionais ou continentais. Para deformações globais, podem-se citar aquelas provocadas pelo movimento relativo entre as placas tectônicas, variação na rotação da Terra, e outros.

As ações que introduzem ou modificam os esforços ou deformações nas estruturas são classificadas segundo a NBR 8681 (ABNT, 2003), conforme a variabilidade no tempo em três categorias: permanentes, variáveis e excepcionais. As ações permanentes ocorrem com valores constantes ou de pequena variação em torno de sua média, como por exemplo, a ação de uma parede sobre uma viga ou laje e o peso de pisos e revestimentos. As ações variáveis são as que oferecem variações significativas em torno de sua média, como por exemplo, as cargas acidentais da construção, efeitos do vento, da temperatura, do atrito, dentre outras. E as ações excepcionais são as que têm duração extremamente curta e baixa probabilidade de ocorrência durante a vida útil da construção, mas devem ser consideradas nos projetos de determinadas estruturas. Consideram-se como excepcionais as ações decorrentes de causas como explosões, choque de veículos, enchentes e outros.

Cabe ainda ressaltar, as cargas acidentais consideradas pela mesma norma técnica, como ações variáveis que atuam nas construções em função de seu uso (pessoas, mobiliário, veículos, materiais diversos, e outros).

Uma análise geométrica em uma avaliação de deformação pode-se seguir um, ou ambos os caminhos (CHEN; CHRZANOWSKI, 1986):

- Fornecer informações sobre a situação geométrica de um corpo deformável, a mudança na sua posição, forma e dimensões, e
- Fornecer informações sobre o estado físico de um corpo deformável, o estado de tensões internas e a relação carga – deformação.

³ WHITTEN, A. **Monitoring crustal movement**. *Lecture notes used in China*, 1982.

A partir do resultado da análise geométrica, pode-se fazer uma interpretação qualitativa das causas da deformação. Entretanto, para o segundo caso, é necessário um entendimento físico, derivando informações sobre a relação carga – deformação, utilizando-se dois métodos:

- 1) Método Estatístico (análise de regressão) - método *a posteriori*: analisando-se a correlação entre as deformações observadas e as cargas observadas (causas internas ou externas produzindo deformação), e
- 2) Método Determinístico (método de natureza *a priori*): utilizando-se informações das cargas, propriedades dos materiais, geometria do corpo ou estrutura, e as leis físicas que regem a relação da tensão-deformação.

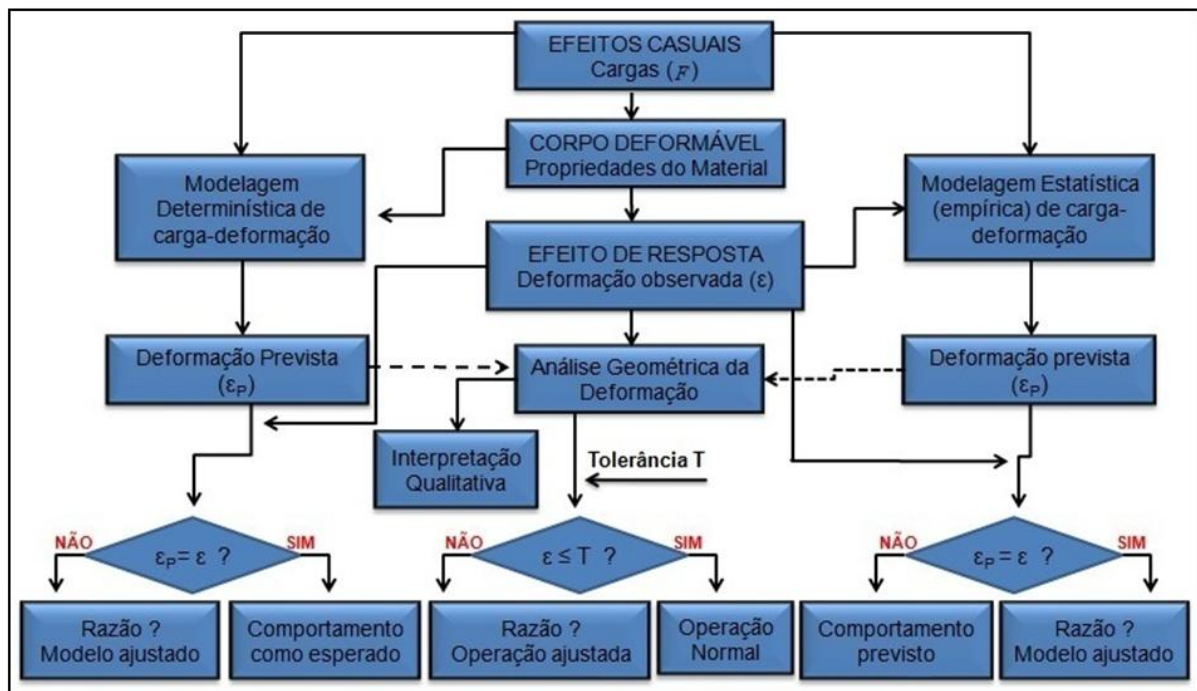


FIGURA 2 - FLUXOGRAMA DA INTERPRETAÇÃO DA DEFORMAÇÃO
 FONTE: Adaptado de CHEN; CHRZANOWSKI (1986, p. 03).

Desta forma, fica evidente a necessidade do conhecimento das propriedades físicas e mecânicas dos materiais para desenvolver, avaliar e monitorar adequadamente um projeto ou mesmo determinar a relação correta entre a carga aplicada, o deslocamento e/ou a deformação resultante de uma estrutura carregada.

2.2 MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS

Segundo Assan (2010, p. 81), as construções como edifícios habitacionais e industriais, pontes e viadutos, barragens, dentre outros, mantêm uma estrutura que resiste ao seu próprio peso e às ações oriundas do meio externo. Estas estruturas são constituídas por elementos que são responsáveis pela sua integridade, conhecidos como elementos estruturais ou partes estruturais.

Diferentes tipos de estruturas são construídas a partir de um planejamento formal, gerenciando assim, uma sequência de trabalhos e execuções mediante ao prazo determinado e ao custo pré - definido. Entretanto, um bom planejamento se enquadra naquele que tem visão geral e total do empreendimento: antes da construção, durante e ao término da mesma.

Com o passar dos anos, o desenvolvimento da construção civil ficou evidente, permitindo a diminuição das dimensões das peças que compõe uma estrutura, das formas geométricas envolvidas, na busca de soluções por aplicações destas estruturas e na combinação de diferentes materiais. O conhecimento nesta área, juntamente com as teorias e técnicas de análise desenvolvidas, permitiram que os engenheiros acompanhassem também, as exigências de um mundo moderno.

Discute-se ainda, se o aprimoramento resultou diretamente dos novos materiais e métodos de construção, ou então, foram as mudanças nas intenções estéticas que se adaptaram as estas técnicas.

Acompanhando uma tendência nacional, o desempenho do setor da construção civil apresentou uma taxa de crescimento de 11,6% em 2010, o melhor desempenho nos últimos 24 (vinte e quatro) anos, segundo o PIB setorial (IBGE, 2011). Este crescimento tem sido notório em todo o Brasil, sendo visível a força do setor.

Entretanto, como qualquer outro setor, não há somente pontos positivos. Vinculado ao desempenho do setor, surge o alerta e a preocupação com o comportamento destas estruturas, mediante a tantos desastres de causas humanas e ambientais. Busca-se uma condição de segurança que deve ser satisfeita para qualquer estrutura, apresentando-se como capaz para suportar diversas ações, mantendo-se as condições funcionais para as quais a estrutura foi construída.

Porém, nem sempre isso acontece. Muitas estruturas acabam chegando no seu estado limite⁴, ou sua vida útil diminui em função de algum problema intrínseco ou extrínseco. Desta forma, sendo necessária a realização de ações de segurança preventiva, detectando primeiramente se o problema está na própria estrutura ou se está no entorno da mesma.

Na maioria das vezes, as alterações que ocorrem no entorno de estruturas são devido a causas construtivas, ou pela instabilidade geológica comprometida por diferentes aspectos (drenagem, erosões, dentre outras). Em decorrência da desestabilização de maciços de terra ou rocha, tanto a constituição geológica e os parâmetros de resistência da área a um determinado deslocamento ou movimento, ficam comprometidos. O monitoramento do comportamento cinemático acima da superfície constitui um dos temas importantes de pesquisa, tanto para os engenheiros como para os geólogos, visando um estudo da estabilidade da superfície e propondo seguimentos de monitoramento para área (LAMBROU; PANTAZIS, 2006).

Nas medições de deslocamentos e/ou deformações por métodos geodésicos, tanto para o acompanhamento de estruturas de engenharia, movimentos do solo ou movimentos tectônicos, duas redes são distinguidas (CHRZANOWSKI⁵, 1981 *apud* CHEN, 1983, p. 07):

- Rede absoluta, em que alguns pontos são, ou foram assumidos, fora do objeto deformável, servindo como pontos de referência para a determinação de deslocamentos absolutos dos pontos do objeto, e
- Rede relativa, em que todos os pontos levantados são assumidos que estão localizados no objeto deformável.

Além das redes geodésicas de monitoramento, Chen (1983) aponta os métodos geodésicos convencionais, como: redes horizontais de monitoramento: redes de triangulação, trilateração e poligonação; e nivelamento geométrico de

⁴ Segundo a NBR 8681 (ABNT, 2003), podem ser divididos em estados limites últimos ou estados limites de serviço. Os estados limites considerados nos projetos de estruturas dependem dos tipos de materiais de construção empregados e devem ser especificados pelas normas referentes ao projeto de estruturas com eles construídas.

⁵ CHRZANOWSKI, A. **A comparison of different approaches into the analysis of deformation measurements**. FIG XVI International Congress, Montreux. August, 1981.

primeira ordem. Considera ainda, métodos fotogramétricos, projetos especializados (extensômetro mecânico, interferômetro a laser, e outros) e técnicas espaciais (GPS -*Global Positioning System*).

Segundo Secord (1995, p. 02), um sistema de monitoramento pode consistir em duas categorias de obtenção de dados: geodésicos ou geotécnicos. Os métodos geodésicos envolvem observáveis de ângulos ou direções, distâncias espaciais e diferenças de alturas. Os métodos geotécnicos consistem nas mesmas observáveis trabalhando-se com distâncias pequenas (distâncias de alguns metros, em vez de centenas de metros), bem como, com medidas do estado físico ou mecânico do objeto que está sendo monitorado. Kahmen e Faig (1988, p. 565), dividem da mesma forma e nomenclatura o monitoramento de estruturas. Sendo que, os métodos geotécnicos (ou físicos) são utilizados para detectar movimentos relativos, e os métodos geodésicos são primeiramente utilizados para detectar movimentos absolutos.

Os levantamentos geodésicos proporcionam informações globais sobre o comportamento do objeto deformável, enquanto os métodos geotécnicos fornecem informações locais, sem qualquer verificação ou somente a comparação com outras medidas independentes (*DEPARTMENT OF THE ARMY*⁶ *apud* NADAL M. A. D., 2008, p. 26).

A característica mais comum abordada no âmbito destes levantamentos é a possibilidade de realizar medições de deslocamentos de alta confiabilidade com o menor número de pontos possíveis, comparando-se, por exemplo, com o tamanho de uma barragem (ALBA, 2006).

O princípio básico de um trabalho de monitoramento geodésico é detectar variações de coordenadas (bidimensionais e/ou tridimensionais) de pontos pré-definidos em um período de tempo determinado. No caso da avaliação em laboratório, há necessidade de aplicar cargas na estrutura monitorada e determinar os intervalos para a obtenção de coordenadas. Tanto em laboratório quanto em situações reais, os resultados obtidos pelos métodos geodésicos indicarão se os pontos tiveram suas coordenadas alteradas, ou seja, se ocorreu deslocamento e/ou uma deformação. Para obtenção destas variações na estrutura, há necessidade de

⁶ DEPARTMENT OF THE ARMY. **Manual 1110-1-1004 deformation monitoring and control surveying**. U.S. Army Corps of Engineers Washington, DC, 1994.

confiabilidade no equipamento a ser utilizado, ou seja, estarem calibrados ou retificados, como também, repetibilidade de observações, integração de diferentes tipos de observações e análise estatística dos dados adquiridos.

2.2.1 Métodos geodésicos para monitoramento

Nas décadas de 1940 e 1950, fundamentados sobre o controle de estruturas, os Engenheiros e Cientistas enfatizavam a triangulação geodésica como a única ferramenta de pesquisa (GIUSSANI⁷ *apud* CHEN, 1983, p. 02). Entretanto, os estudos científicos na avaliação e nos métodos de medições das deformações, como também, no comportamento das estruturas tem se aprofundado e melhorado muito nos últimos anos, principalmente em decorrência dos avanços nos instrumentos utilizados. Este avanço já era perceptível na década de 1980, quando Chen (1983, p. 02) confirmava uma perceptível melhora no conhecimento nesta área.

Entre os avanços, do ponto de vista da precisão instrumental viável, a distinção entre as técnicas geodésicas e geotécnicas está sendo menos perceptível. Com recentes desenvolvimentos em ambas as instrumentações, geodésica e geotécnica, alcançaram-se resoluções e precisões instrumentais próximas em ambas às técnicas, como também, automação total e processamento dos dados, praticamente, em tempo real. Instigando assim, a novos desafios, como nas possibilidades de escolha do equipamento, como combiná-los em um sistema de controle integrado, quais medições estruturais (geodésicas e geotécnicas) podem se complementar, entre outros (*DEPARTMENT OF THE ARMY*, 2002).

Lutes (2002) apresentou um sistema automatizado de coleta e processamento de dados desenvolvido para realizar um monitoramento geodésico de deslocamentos de pontos em uma das maiores obras de barragem de aterro dos Estados Unidos, localizada no sul da Califórnia (FIGURA 3). Por ser uma obra muito grande e que ao mesmo tempo, necessita de monitoramentos frequentes, seria

⁷ GIUSSANI, A. **Control of big structure by integrated instruments and methods**. Proceedings of FIG 16th International Congress, Montreux, Aug, 1981.

inviável e muito trabalhoso estar aplicando métodos convencionais de monitoramento. Desta forma, projetou-se uma rede permanente de estações totais robotizadas e um *software* específico para processar os dados automaticamente e enviar ao operador as coordenadas dos pontos atualizados após cada ciclo de medição. O projeto apresentou resultados que viabilizou a aplicabilidade em outros projetos de monitoramentos, oferecendo um conjunto de dados de qualidade com o mínimo de manutenção, mostrando-se rentável e de alta precisão.



FIGURA 3 - BARRAGEM LOCALIZADA NO *DIAMOND VALLEY LAKE* – EUA
FONTE: Adaptado de GOOGLE EARTH (2011).

Paciléo Netto *et al.* (2002) efetuaram vários estudos e experimentos visando monitorar o deslocamento em estruturas através de métodos e técnicas geodésicas. A ponte estaiada (FIGURA 4) da Estação Santo Amaro sobre o Rio Pinheiros – São Paulo (aproximadamente 13 km) foi uma das estruturas monitoradas com intuito de determinar e relatar diariamente o posicionamento de pontos isolados da mesma. Numa primeira fase foram monitorados os deslocamentos em pontos específicos da estrutura em função de variações da temperatura e da geometria da ponte. Implantaram-se pontos referenciais estáveis, de modo que os dados observados tivessem uma única referência no espaço e no tempo, permitindo comparações das

informações entre épocas distintas de monitoramento. Neste caso, distribuídos dentre as etapas do trabalho, foram utilizados desde GPS com dupla frequência, nível digital, medidores eletrônicos de distância e estação total.



FIGURA 4 - PONTE ESTAIADA – SÃO PAULO – BRASIL
FONTE: FERREIRA (2007).

Em outro estudo, também realizado por Paciléo Netto, *et al.* (2002), verificaram durante dois anos os recalques de quatro pilares e seis vigas de um prédio do campus universitário da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). As observações foram realizadas em pinos especiais engastados na estrutura de concreto armado, onde apoiava-se a mira de ínvar. Neste caso, utilizou-se apenas um nível digital (precisão $\pm 0,3$ mm/km). O marco estável utilizado como referência estava aproximadamente 60 m do prédio. Obtiveram resultados de recalque que não ultrapassaram 1,4 mm, com desvio padrão de aproximadamente $\pm 0,5$ mm.

Em um trabalho realizado por Gordon *et al.* (2001), apresentaram uma análise estrutural de uma ponte de madeira e aço datada de 1950, localizada em Toodyay, Austrália. A ponte de estudos já havia passado por vários reparos para reforçar sua estrutura, entretanto, em 2001 foi determinado que sua vida útil operacional estaria chegando ao fim. Os seguintes equipamentos foram utilizados:

acelerômetros e extensômetros para análise de elementos finitos; *laser scanner* para coleta de informações densas dos elementos estruturais da ponte; e a estação total, utilizada para fornecer informações de orientação, permitindo assim, a transformação das nuvens de varredura *laser* em um sistema de coordenadas locais. Através dos testes realizados em campo para o monitoramento de deformações, obteve-se com o *laser scanner* uma precisão de $\pm 2,0$ mm (eixo Y), $\pm 3,2$ mm (eixo X) e $\pm 2,8$ mm (eixo Z). O mesmo autor evidenciou ainda que, deve-se maximizar a cobertura de todos os objetos e tentar minimizar os vazios causados pela oclusão de objetos. Entretanto, para as vigas, o equipamento apresentou-se exemplar para ambos os efeitos. Outra preocupação está na reflectância dos objetos, sendo que, se esta for baixa apresentará descontinuidades nas nuvens de pontos. Os mesmos autores realizaram outros trabalhos com o *laser scanner* para fins de monitoramentos de estruturas e verificaram, a partir de uma simulação, que o *scanner* utilizado no experimento detectou o movimento em uma parede de um edifício, sendo que, as magnitudes dos deslocamentos foram detectadas na mesma ordem em que os movimentos foram induzidos.

Zocolotti Filho (2005) apresentou uma metodologia para o monitoramento de pontos localizados em galerias de inspeção de barragens empregando-se técnicas de poligonação. Desta forma, desenvolveu esta metodologia empregando poligonais de precisão, apresentando sistemas para coleta e processamento de dados, bem como o desenvolvimento instrumental voltado para esta aplicação, tais como: dispositivos de centragem forçada adaptáveis às galerias para conduzir as poligonais de precisão em seu interior e sistemas precisos para pontaria angular refinada. O estudo de caso foi realizado na U.H. de Salto Caxias, e a metodologia mostrou-se adequada para o levantamento em questão.

Martini (2005) desenvolveu um trabalho sobre calibração de prismas de reflexão total em forma de fita adesiva e em acrílico e sua aplicação em monitoramento de deslocamentos de estruturas. O autor utilizou a Base de Calibração de Medidores Eletrônicos de Distância, localizada na Fazenda do Canguirí, pertencente à Universidade Federal do Paraná e o Interferômetro Laser, disponibilizado pelo Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG – UFPR). Em seus experimentos, observou que, os resultados para o ângulo máximo de incidência do sinal de medida do refletor para a fita adesiva foi de 50° e para o

refletor de acrílico de 25°. Além disso, para ângulos acima destes valores a intensidade do sinal devolvido pelo refletor apresentava-se baixa, comprometendo a precisão da distância medida. A avaliação realizada em relação às constantes do prisma ficou na ordem do décimo do milímetro. Quanto ao alcance da medida em relação à dimensão do refletor em forma de fita adesiva, afirmou que para os equipamentos utilizados, as curvas geradas pelos gráficos foram semelhantes e tiveram um comportamento quase linear. Após aplicação da fita adesiva em pontos de monitoramento da Usina de Salto Caxias, observou que a mesma apresentou resistência às intempéries, sendo que, sua fixação e manutenção seguiram as recomendações do fabricante. Algumas coordenadas dos pontos monitorados apresentaram variações acima da tolerância avaliada, podendo atribuir este fato, segundo o autor, a ocorrência de deslocamentos na estrutura e/ou imprecisão na obtenção da orientação do azimute do alvo, causado pela deficiência do sistema de pontaria do mesmo.

Com estes exemplos de trabalhos científicos é possível analisar as diversas aplicações no estudo do monitoramento de estruturas através de métodos e técnicas geodésicas, implicando em diferentes finalidades, diferentes estruturas, aplicações de instrumentos, combinações deles, entre outros.

Dentre os métodos e técnicas geodésicas utilizadas para fins de monitoramento, podem - se destacar:

- Nivelamento geométrico de precisão;
- Triangulação e Trilateração geodésica;
- Interseção e Irradiação;
- Poligonação;
- Sistema de Posicionamento Global (GPS);
- Fotogrametria, e
- *Laser Scanning*.

Maior enfoque será dado ao Método Irradiação Tridimensional, mediante a sua utilização no desenvolvimento deste trabalho. Entretanto, para maiores informações dos demais métodos recomenda-se: NEVES (2008) e KRELLING (2006).

2.2.1.1 Método de irradiação tridimensional

Um dos métodos consagrados nos levantamentos geodésicos e topográficos é o da Irradiação Tridimensional, que consiste em, observar pontos a partir de uma estação total instalada e orientada em relação a um sistema de referência. A orientação da estação total baseia-se no registro de um azimuth conhecido ou uma direção escolhida, sendo que, as direções e as distâncias são mensuradas a partir dessa direção de referência.

2.2.1.1.1 Modelo matemático funcional para coordenadas topográficas tridimensionais

O denominado problema fundamental tridimensional (NADAL C. A., 2008) pode ser matematicamente representado e analisado na FIGURA (5). Neste caso, define-se um sistema de coordenadas ortogonais tridimensionais local.

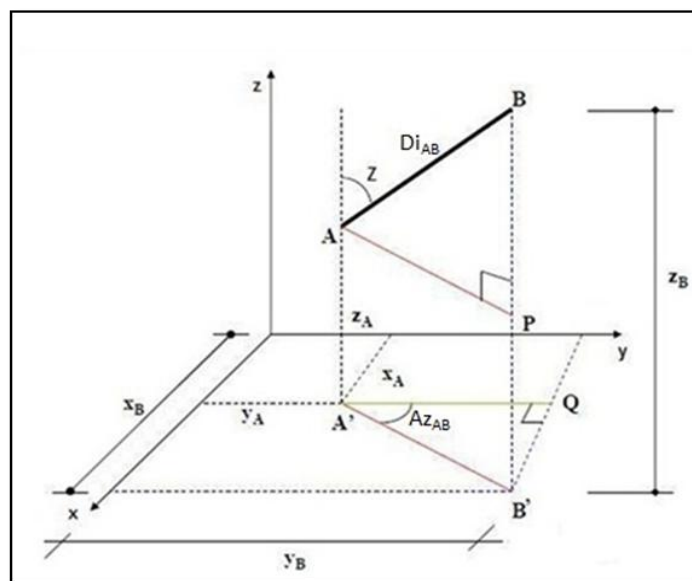


FIGURA 5 - SISTEMA DE COORDENADAS CARTESIANAS ORTOGONAIS UTILIZADO NO MÉTODO DE IRRADIAÇÃO TRIDIMENSIONAL
 FONTE: NADAL C. A. (2008, p. 39).

As coordenadas do ponto B podem ser calculadas a partir das coordenadas do ponto A, através de observações efetuadas por irradiação tridimensional. Pode-se considerar este sistema com origem no ponto cardã (centro geométrico teórico da estação total), com o eixo do y coincidindo com a linha norte-sul e o eixo do z apontando para o zênite, formando assim, um terno dextrógiro.

O cálculo das coordenadas tridimensionais do ponto B pode ser efetuado a partir do azimuth da direção AB (Az_{AB}), da distância inclinada entre A e B (Di_{AB}) e do ângulo zenital (Z), seguindo-se as EQUAÇÕES (09), (10) e (11):

$$X_B = X_A + Di_{AB} \cdot \text{sen}(Z) \cdot \text{sen}(Az_{AB}) \quad (09)$$

$$Y_B = Y_A + Di_{AB} \cdot \text{sen}(Z) \cdot \cos(Az_{AB}) \quad (10)$$

$$Z_B = Z_A + Di_{AB} \cdot \cos(Z) + h_i - h_s \quad (11)$$

onde:

X_A, Y_A, Z_A : Coordenadas do ponto A;

X_B, Y_B, Z_B : Coordenadas do ponto B;

Di_{AB} : Distância inclinada entre os pontos A e B;

Az_{AB} : Azimute da direção AB;

Z : Ângulo zenital, neste caso, do ponto A para o ponto B;

h_i : Altura do instrumento, e

h_s : Altura do prisma ou alvo utilizado.

Inversamente conhecidas as coordenadas tridimensionais dos pontos é possível a obtenção de observáveis, as quais são apresentadas nas EQUAÇÕES (12), (13) e (14):

- Distância espacial entre os pontos A e B:

$$D_{AB} = [(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 + (Z_B - Z_A)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

- Ângulo zenital entre o ponto A e B:

$$Z_{AB} = \arccos \frac{Z_B - Z_A}{[(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 + (Z_B - Z_A)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (13)$$

- Cálculo do azimuth entre os pontos A e B:

$$Az_{AB} = \arctg \frac{X_B - X_A}{Y_B - Y_A} \quad (14)$$

2.2.1.2 Estação total

A escolha de um equipamento varia de acordo com as necessidades do trabalho a desempenhar. Assim, dependerá da precisão exigida e do conhecimento da precisão dos equipamentos, que por sua vez, devem estar calibrados ou retificados para garantir a confiabilidade das medições.

Todos os instrumentos de medidas estão associados a uma incerteza da medição, pelo fato dos instrumentos não serem ideais, ou seja, não conseguem medir a mesma grandeza obtendo sempre o mesmo valor. Isto ocorre devido a diversos fatores internos e externos ao instrumento, como condições atmosféricas e do operador.

Há instrumentos de medição que fornecem ângulos, distâncias e desníveis. Como também, com o aprimoramento de tecnologias, pode-se com apenas um equipamento obter os três tipos de medição, como por exemplo, a Estação Total.

Atualmente, a estação total é um equipamento utilizado, principalmente, para levantamentos topográficos e locação na engenharia, construções e monitoramentos de estruturas. Um exemplo é a Estação Total TC2003 da Leica (FIGURA 6), o qual é muito utilizada para monitoramentos de estruturas, principalmente pela sua precisão angular de 0,5" (meio segundo de arco).

A precisão angular de uma estação é especificada pelo fabricante e, refere-se ao desvio padrão de uma direção observada em uma série com dupla posição da luneta: posição direta (PD) e posição inversa (PI).

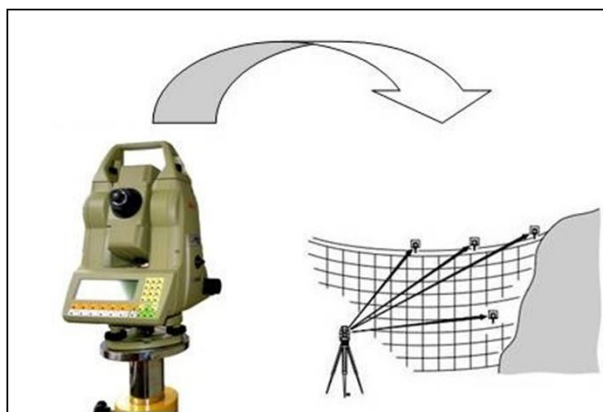


FIGURA 6 - ASPECTO ILUSTRATIVO DA UTILIZAÇÃO DA ESTAÇÃO TOTAL TC2003 - LEICA
 FONTE: Adaptado de LEICA (1998, p. 333).

Segundo a Norma de Execução de Levantamento Topográfico NBR 13133 (ABNT, 1994), a classificação das estações totais, segundo suas precisões, é dada de acordo com o QUADRO (1):

CLASSES	PRECISÃO ANGULAR	PRECISÃO LINEAR
Precisão Baixa	$\leq \pm 30''$	$\pm (5\text{mm} + 10\text{ppm})$
Precisão Média	$\leq \pm 07''$	$\pm (5\text{mm} + 05\text{ppm})$
Precisão Alta	$\leq \pm 02''$	$\pm (3\text{mm} + 03\text{ppm})$

QUADRO 1 - CLASSIFICAÇÃO DAS ESTAÇÕES TOTAIS SEGUNDO SUAS PRECISÕES
 FONTE: NBR 13133 (ABNT, 1994).

Através das informações medidas com este equipamento, como direções horizontais, ângulos verticais e distâncias inclinadas, podem-se calcular distâncias horizontais, desníveis e coordenadas dos pontos visados.

Atualmente, os fabricantes de estações totais têm aprimorado muito estes equipamentos, visto as necessidades e exigências do consumidor e a ampliação da aplicação destes equipamentos em diversas áreas. Diferentes modelos destes equipamentos variam em precisão, na coleta de dados (automática, por exemplo) e nas possibilidades de processamento de dados.

A estação total ainda permite realizar correções no momento da obtenção das medições ou até realizar uma programação prévia para aplicação automática de determinados parâmetros, como condições ambientais (temperatura e pressão atmosférica) e constante do prisma (VEIGA *et al.*, 2007, p. 59). Além disso, segundo os mesmos autores, é possível configurar o instrumento em função das necessidades do trabalho a desempenhar, alterando valores como:

- Altura do instrumento;
- Altura do refletor;
- Unidade de medida angular;
- Unidade de medida de distância, e
- Origem da medida do ângulo vertical (zenital, horizontal, nadiral, e outros).

Algumas estações totais (por exemplo, a TC2003 - Leica) necessitam de prismas refletores ou de adesivos refletores para a realização das mensurações. Os prismas refletores de vidro (FIGURA 7) são os mais utilizados em trabalhos de monitoramentos, devido à sua alta estabilidade para suportar variações de temperatura, permitindo uma pontaria de alta precisão, com um preciso e correto alinhamento do refletor com a linha de visada do instrumento. Além disso, permite ser instalado na verdadeira posição do ponto, devido à sua constante do prisma (igual a zero) (LEICA, 2003⁸ *apud* MARTINI, 2005, p. 14).

⁸ LEICA GEOSYSTEMS. **Reflectors for Leica total stations**. Disponível em: <http://www.leica-geosystems.com/ims/product/tps5000_reflectors.htm>. Acesso em: 14/04/2004.



FIGURA 7 - ASPECTO DE UM PRISMA REFLETOR DE VIDRO
FONTE: MARTINI (2005, p. 13).

Além dos prismas de vidro, têm-se os prismas de acrílico, os quais são constituídos por inúmeros pequenos refletores de canto (diâmetro de aproximadamente 2 mm). Em função da pequena abertura de cada um dos microrefletores de canto que o compõem, a utilização não dependerá somente da potência de emissão do equipamento utilizado, mas também, da distância entre o transmissor e o receptor (RÜEGGER, 1996).

Já a fita adesiva refletora (FIGURA 8), consiste em milhares de lentes micro-esféricas, agregadas a uma resina sintética e recobertas por um plástico transparente e flexível, conferindo-lhe uma superfície lisa e plana. Possui ainda um adesivo sensível à pressão, o qual é protegido por uma película siliconada de fácil remoção (3M, 2003⁹ *apud* MARTINI, 2005). Além disso, as fitas refletoras são auto-adesivas e podem ser fixadas em estruturas como marcas de referência para medidas de deslocamentos. Sua aplicação é restrita, tendo em vista de que a refletividade é reduzida em função do tamanho dos grânulos, da ordem de 0,25 mm (RÜEGGER, 1996).

⁹ 3M SCOTCHLITE. **Diamond grade™ LDP reflective sheeting**. Product bulletin. Ontário, Canada, 2003.

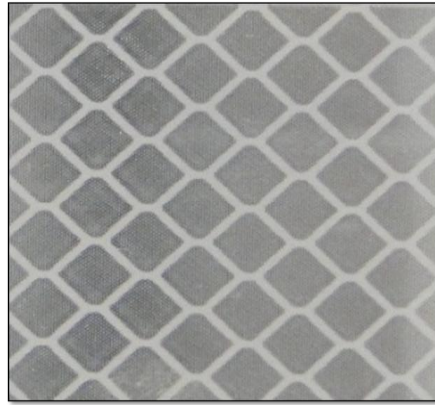


FIGURA 8 - ASPECTO ILUSTRATIVO DE UMA FITA ADESIVA REFLETORA
FONTE: O autor (2012).

Segundo o mesmo autor, as fitas adesivas refletoras apresentam resistência a intempéries, desde que a sua fixação e manutenção obedeçam as recomendações do fabricante.

2.2.1.3 Erros de observação

As observações são representações numéricas de quantidades físicas como comprimento, ângulo, peso, dentre outras. As observações (ou medidas) estão sempre eivadas de erros, ou seja, quando se repete n vezes uma medida de precisão, os n valores não são idênticos, mas estão dispersos numa certa região ou intervalo, dispersão esta devida a erros (DALMOLIN, 2010, p. 49). Afirma-se também, que as medidas possuem uma propriedade inerente a elas, de flutuações probabilísticas ou aleatórias.

Estes erros de medidas podem ser causados (GEMAEL, 1994, p. 59):

- Pela falibilidade humana;
- Pela imperfeição do equipamento, e/ou
- Pela influência das condições ambientais.

No primeiro caso incluem os chamados erros grosseiros, que podem ocorrer pela desatenção do observador, como por exemplo, a inversão de dígitos numa leitura ou digitação, erro de identificação do objeto, dentre outros.

As observações eivadas com estes erros às vezes constituem em problemas, sendo às vezes fácil de detectar, e em outras situações, não. Entretanto, somente um teste estatístico pode justificar ou não a rejeição de uma observação sujeita de abrigar um erro grosseiro. Portanto, cabe ao observador precaver e evitar a ocorrência ou detectar a presença destes erros.

Entretanto, podem surgir ainda os erros sistemáticos, aqueles erros que ainda não foram detectados ou ainda, resíduos que não foram modelados. São produzidos por causas conhecidas e podem ser eliminados por técnicas especiais de observação ou eliminados *a posteriori* através de fórmulas fornecidas pela teoria (GEMAEL, 1994, p. 60). Deve-se realizar um planejamento para evitar certas influências sistemáticas, pois estas podem estar associados ao homem, como por exemplo, um nivelador que procede a leitura sempre um pouco abaixo (ou sempre um pouco acima) do traço da mira.

Os erros acidentais ou aleatórios são aqueles que permanecem após os erros anteriores (grosseiros e sistemáticos) terem sido eliminados. Os erros aleatórios têm causas acidentais, não seguem nenhum tipo de lei e ora ocorrem num sentido ora em outro, podendo ser minimizados pelo incremento do número de observações em um processo estatístico. Entretanto, segundo Gemael (1994, p. 60), por apresentarem distribuição normal, tendem a neutralizar quando o número de observações cresce.

2.2.1.3.1 Erros instrumentais

Existem alguns erros instrumentais que afetam a precisão e acurácia das medidas, entre eles, serão apresentados apenas os inerentes às observações realizadas neste trabalho:

- Erro de verticalidade do eixo principal: ocorre quando o eixo principal não coincide com a vertical (FIGURA 9). Este erro se enquadra na operação de nivelamento do instrumento, sendo que, se necessário, os níveis de calagem devem ser retificados (GOMES, 2006, p. 27).

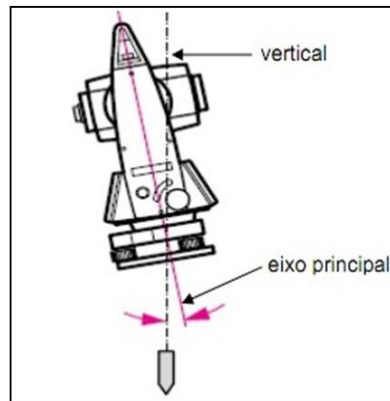


FIGURA 9 - ASPECTO DO ERRO INSTRUMENTAL DE VERTICALIDADE DO EIXO PRINCIPAL
 FONTE: ZEISKE (2000)¹⁰ *apud* GOMES (2006, p. 27).

- Erro de não horizontalismo ou do eixo secundário (FIGURA 10): corresponde ao desvio do eixo secundário ou simplesmente, do eixo mecânico de rotação da luneta (i), em relação a uma linha perpendicular ao eixo principal, ou vertical, que é o eixo de rotação do limbo horizontal (ZOCLOTTI FILHO, 2005, p. 22). Este erro acaba afetando indiretamente as medidas de direções horizontais, pois se projeta no limbo horizontal.

¹⁰ ZEISKE, K. **Surveying made easy**. Disponível em:
 <<http://www.leica-geosystems.com/se/surveying/Newspaper/Broschyrer/722510en.pdf>>. Acesso em:
 nov. 2005.

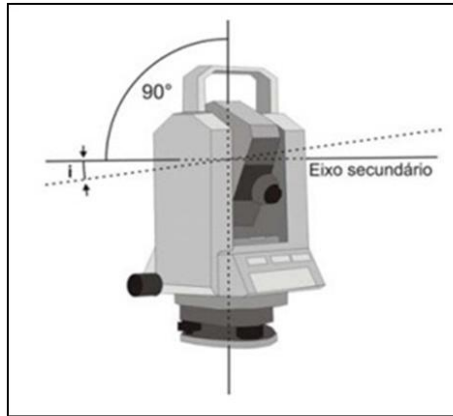


FIGURA 10 - ASPECTO DO ERRO INSTRUMENTAL DO EIXO SECUNDÁRIO
 FONTE: ZOCCOLOTTI FILHO (2005, p. 22).

- Erro de zênite instrumental: ocorre quando, na medição do ângulo zenital, o zero da escala não coincide com o zênite (FIGURA 11).

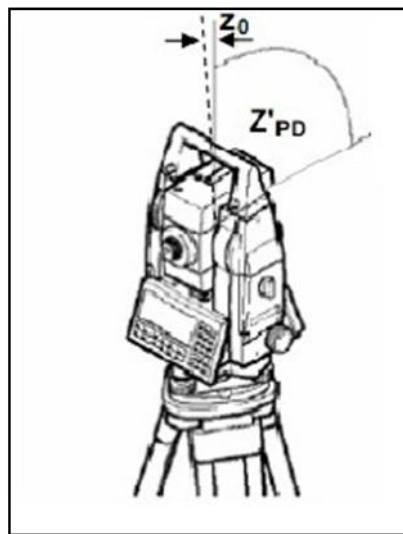


FIGURA 11 - ASPECTO DO ERRO DE ZÊNITE INSTRUMENTAL (Z_0)
 FONTE: Adaptado de ZEISKE (2000) *apud* GOMES (2006, p. 25).

Para minimizar os efeitos do erro de zênite instrumental devem-se realizar as observações em posição direta e inversa da luneta, como também, determinar o valor do erro para posterior correção em todas as medições de distância zenital realizadas somente em uma posição da luneta (GOMES, 2006, p. 25).

Segundo o mesmo autor, o procedimento para determinação do valor do erro de zênite deve ser realizado iniciando-se com a estação total na posição direta, realizando-se a leitura do ângulo zenital (Z'_{PD}) em um ponto (P) definido (FIGURA 12).

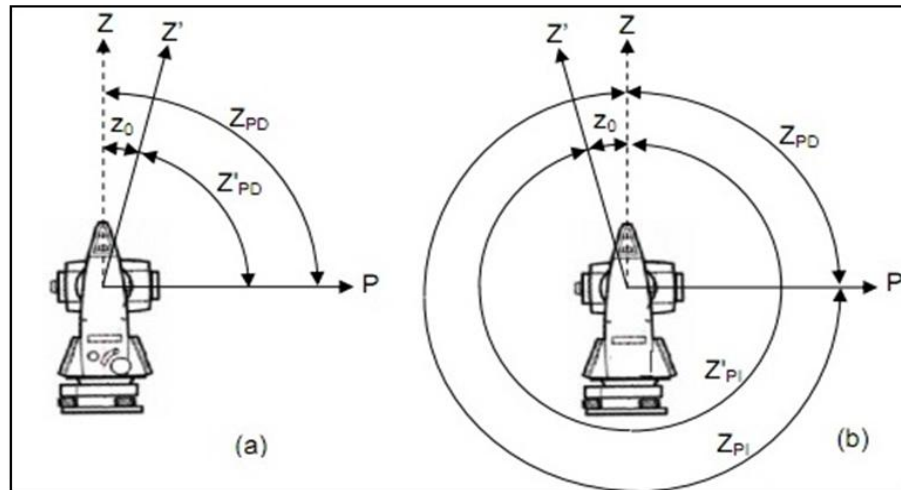


FIGURA 12 - LEITURAS DO ÂNGULO ZENITAL EM POSIÇÃO DIRETA E INVERSA DA LUNETTA
FONTE: GOMES (2006, p. 26).

Observando-se a FIGURA (12), obtém-se que:

$$Z_{PD} = Z'_{PD} + Z_0 \quad (15)$$

onde:

Z_{PD} : Distância zenital em posição direta isenta de erro;

Z'_{PD} : Distância zenital em posição direta, e

Z_0 : Erro de zênite instrumental.

Após esta etapa, deve-se repetir a pontaria no ponto (P) na posição inversa (PI), procedendo-se a leitura do ângulo zenital (Z'_{PI}), conforme apresentado na FIGURA (12-b).

$$Z_{PD} = 360^\circ - Z'_{PI} - Z_0 \quad (16)$$

onde:

Z_{PI} :Distância zenital em posição inversa isenta de erro, e

Z'_{PI} :Distância zenital em posição inversa.

Para obtenção do valor do erro de zênite instrumental (Z_0), deve-se ainda proceder à subtração da EQUAÇÃO (16) pela EQUAÇÃO (15).

$$Z_0 = \frac{360^\circ - Z'_{PI} - Z'_{PD}}{2} \quad (17)$$

Para a determinação da distância zenital isenta de erro, procede-se a soma da EQUAÇÃO (15) com a EQUAÇÃO (16).

$$Z = \frac{Z'_{PD} - Z'_{PI}}{2} + 180 \quad (18)$$

- Refração atmosférica: maior fonte de erros na determinação de ângulos zenitais. O efeito de refração no ângulo zenital é usualmente calculado a partir de um modelo adiabático da atmosfera real, representando o estado da atmosfera numa média para todas as latitudes e estações do ano. Esse modelo apresenta valores fixos da temperatura e pressão do ar e perfis verticais fixos de temperatura e pressão (GOMES, 2006, p. 36).

Os erros instrumentais, de forma geral, podem ser corrigidos ou compensados, através de modelos matemáticos e através da retificação ou calibração dos equipamentos. Principalmente para minimizar os erros sistemáticos, a calibração é fundamental antes de iniciar um trabalho de alta precisão, bem como, as técnicas instrumentais (posição direta e inversa da luneta).

Os erros instrumentais podem se alterar, com o tempo ou com a temperatura, desta forma, deve-se realizar a determinação dos mesmos em algumas etapas: antes da primeira utilização, antes de cada levantamento de precisão, após longos períodos de transporte, após longos períodos de trabalho e se a alteração de temperatura for superior a 20°C (LEICA, 2006).

Para maiores informações dos Erros Instrumentais recomenda-se: *DEPARTMENT OF THE ARMY* (2002), NADAL (2000) e GOMES (2006).

2.2.1.4 Sistema local de referência

As coordenadas locais são baseadas na vertical do lugar e merecem atenção especial, não só no que diz respeito à definição da vertical, mas no que diz respeito à sua conexão com coordenadas globais (JEKELI, 2006, p. 09).

A palavra vertical contempla dois significados distintos: vertical genérica perpendicular às equipotenciais do campo da gravidade e vertical de um ponto, a qual simboliza a direção do vetor gravidade no ponto. A vertical de um ponto é utilizada como referência física em todos os equipamentos de medição utilizados em levantamentos geodésicos e topográficos (NADAL, 2000, p. 17).

Segundo o mesmo autor, de uma maneira geral, adota-se nos trabalhos de Engenharia um sistema local de referência, o qual consiste num terno de eixos ortogonais cartesianos, com origem arbitrária num ponto topográfico definido e com orientação dextrógira, com um dos eixos definido pela vertical do ponto considerado com sentido positivo para fora da superfície, e outro coincidente com a tangente ao meridiano instantâneo materializado no ponto e sentido positivo para o ponto cardeal norte. O terceiro eixo, naturalmente, estará contido na linha leste-oeste com sentido positivo para leste (FIGURA 13).

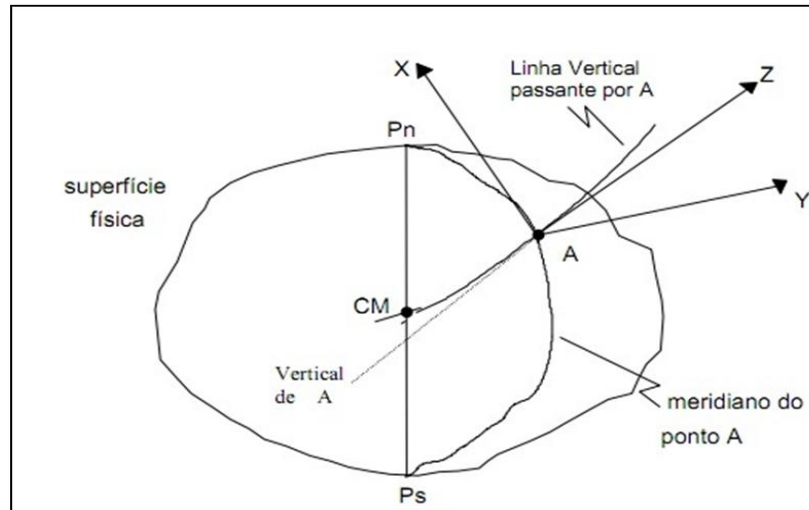


FIGURA 13 - ASPECTO DE UM SISTEMA LOCAL DE REFERÊNCIA
 FONTE: NADAL (2000, p. 19).

Tradicionalmente utiliza-se este sistema de forma simplificada na topografia, ou seja, escolhe-se um ponto da superfície terrestre como origem dos levantamentos e aplica-se este sistema (NADAL, 2000, p. 19). No caso do monitoramento de estruturas, o sistema de coordenadas utilizado para observar os deslocamentos não deve estar no instrumento, e sim, na própria estrutura monitorada. Para o caso deste trabalho, o sistema local de referência estará estabelecido em cada corpo de prova monitorado, conforme ilustrado na FIGURA (14).

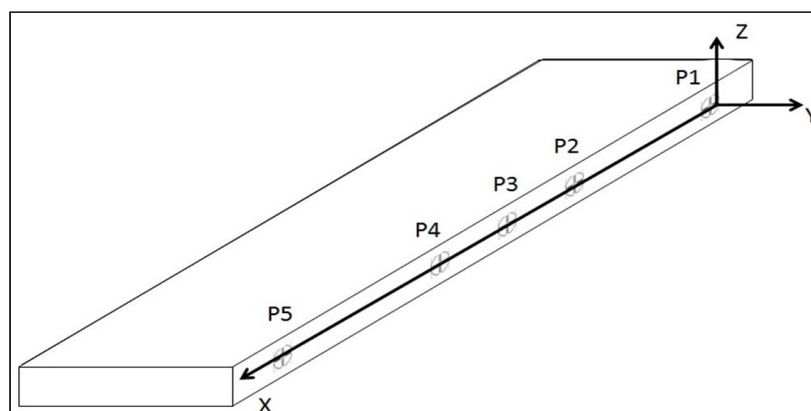


FIGURA 14 - ASPECTO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA NO CORPO DE PROVA MONITORADO
 FONTE: O autor (2012).

2.2.1.4.1 Sistemas de coordenadas instrumentais

As medições efetuadas a partir da utilização de instrumentos são realizadas através de um sistema interno denominado sistema de coordenadas instrumentais. Desta forma, não é possível obter as coordenadas de pontos de forma direta sobre um sistema de referência escolhido, devido às medições estarem relacionadas ao sistema interno do instrumento.

A FIGURA (15) ilustra uma estação total onde, segundo Nadal (2000, p. 20) pode-se associar ao centro do instrumento (c) um sistema de eixos cartesianos ortogonais. O eixo dos z coincide com o eixo principal da estação, o eixo dos x contido no plano do horizonte paralelo a direção zero graus do limbo horizontal e o eixo dos y perpendicular ao eixo dos x no sentido dextrógiro ou levógiro, conforme o selecionado no sistema de leituras. O plano xy deve conter o eixo de basculamento da luneta, também denominado de eixo secundário (y). Sendo que, a linha \overline{ca} deve ser uma reta e coincidir com o eixo óptico da luneta.

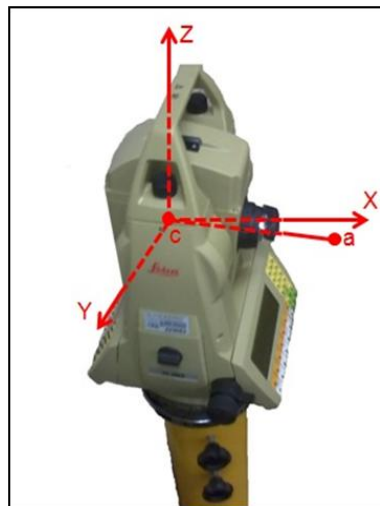


FIGURA 15 - ASPECTO DO SISTEMA DE COORDENADAS INSTRUMENTAIS
FONTE: O autor (2012).

Entretanto, encontram-se muitas dificuldades na materialização deste sistema. Ou seja, o eixo principal não é vertical, o eixo secundário não é horizontal,

portanto não é perpendicular ao eixo principal e, no caso mais geral, ambos não são coplanares. O mesmo ocorre com o eixo óptico em relação ao eixo secundário. Sendo que, o ponto teórico de origem deste sistema é denominado de ponto cardã (NADAL, 2000, p. 20).

Desta forma, três eixos ortogonais entre si formam um sistema de coordenadas tridimensionais ortogonal, fornecendo coordenadas espaciais que definem a posição de um ponto no espaço. Esse ponto pode ser definido no espaço por meio de suas coordenadas cartesianas ortogonais: X, Y e Z, sendo estas determinadas pelas EQUAÇÕES (09), (10) e (11) apresentadas no item (2.2.1.1.1).

2.3 SETOR FLORESTAL MADEIREIRO

A madeira é um dos materiais de construção que tem registros de utilização desde épocas pré-históricas. Esta demanda tão antiga surgiu pela junção da disponibilidade de encontrá-la na natureza com a facilidade de manuseio. Desta forma, estas facilidades implicaram numa pressão muito grande sobre as florestas nativas, emergindo assim, as florestas plantadas.

No Brasil, os reflorestamentos têm alcançado vantagens na produtividade com relação a outros países, devido a fatores favoráveis como o clima, solo, extensão territorial, dentre outros. Essas florestas não só proporcionam uma redução da pressão sobre florestas nativas, como também auxiliam na restauração de áreas degradadas, nos corredores ecológicos, na proteção de recursos hídricos, no sequestro de carbono, dentre outros benefícios. Estes reflorestamentos diferenciam-se em função do produto final que se almeja, vinculado às características de crescimento e manejo silvicultural aplicado.

A partir da produção da matéria prima florestal tem-se o início de uma cadeia produtiva através do processamento primário e da sucessão de produtos florestais. Estes podem ser produtos florestais madeireiros ou não madeireiros, como o látex, resinas, corantes, dentre outros (ABRAF, 2011).

Segundo a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas – ABRAF (2011), o processamento da madeira na indústria pode seguir três caminhos:

primário, secundário e terciário. O processamento primário destina-se ao desdobro da tora, dando origem, por exemplo, ao cavaco, madeira serrada, madeira laminada e o carvão vegetal. O beneficiamento dos produtos oriundos desta primeira transformação em produtos finais, ou podendo ser também intermediários a outros processamentos, denomina-se processamento secundário. O compensado decorativo ou estrutural é resultado do processamento secundário da lâmina de madeira. Entretanto, é no processamento terciário que o produto agregará maior valor econômico. Nesta etapa, a preocupação é aproximar o produto das características e necessidades que o consumidor necessita.

Os produtos de madeira utilizados na Construção Civil variam desde peças com pouco ou nenhum processamento (madeira roliça¹¹) ou até peças com vários graus de beneficiamento, como: madeira serrada e beneficiada, lâminas, painéis de madeira e madeira tratada com produtos preservativos (ZENID, 2009, p. 23).

Entretanto, a madeira utilizada como material de construção oferece vantagens que superam outros materiais tradicionalmente usados, como o aço, concreto e a alvenaria. Dentre as potencialidades da madeira, destacam-se: baixo peso em relação a uma alta resistência e pouco consumo energético para o seu processamento. Apresenta ainda outros aspectos positivos, como: facilidade de fabricação de diversos produtos industrializados; bom isolamento térmico; capacidade para suportar sobrecargas de curta duração; boa resistência ao fogo para uso estrutural, quando comparada com as estruturas de aço e estruturas metálicas; vantagens econômicas, quando seu custo inicial é analisado, levando-se em conta um longo prazo de utilização do material (CUNHA, 2007, p. 10).

Em termos de comparação do comportamento mecânico da madeira com outros materiais, tem-se que para elementos estruturais previstos para a mesma finalidade de uso, como por exemplo, uma viga de madeira e uma de aço, com massa que forneça o mesmo peso para ambas, a viga de madeira possui o mesmo poder de resistência da viga de aço. Se a comparação for feita entre uma viga de madeira e uma de concreto, pode-se dizer que uma viga de madeira com o mesmo volume de uma viga de concreto armado comum possui o mesmo poder de

¹¹ Produto com menor grau de processamento da madeira. Consiste de um segmento de fuste da árvore, obtido por cortes transversais (traçamento) ou mesmo sem esses cortes (varas: peças longas de pequeno diâmetro). São empregados de forma temporária em escoramentos, postes, colunas e construção de andaimes (ZENID, 2009, p. 23).

resistência, sendo aproximadamente cinco vezes mais leve. Significando economia nas fundações (SZÜCS *et al.*, 2008, p. 156).

2.3.1 Painéis de madeira

Os painéis de madeira podem ser definidos produtos de elementos de madeira obtidos a partir da redução da madeira sólida e reconstituídos através de ligação adesiva (IWAKIRI, 2005).

Segundo uma classificação de painéis de madeira reconstituídos pode-se encontrar compostos laminados ou compostos particulados. Nos compostos laminados, estão inclusos os compensados laminados e os compensados sarrafeados (PRATA, 2006. p. 05). Nos compostos particulados pode-se encontrar os painéis minerais, os painéis de fibras, subdivido em fibras duras, M.D.F (*Medium Density Fiberboard*), H.D.F (*High Density Fiberboard*), isolantes e os painéis aglomerados do tipo convencional, “*waferboard*” e O.S.B (*Oriented Strand Board*) (MENDES, 2001).

Os painéis de madeira podem ser usados para fins estruturais e não estruturais, setores da construção civil, naval, indústria moveleira, embalagens, dentre outras. Dependendo da finalidade, como uso interior ou exterior, a composição do adesivo utilizada é diferenciada, como se pode observar QUADRO (02):

Classificação dos Adesivos	Ambiente de Uso	Tipos de Adesivos
Estrutural	Exterior	Fenol-formaldeído (FF)
		Resorcinol-formaldeído (RF)
		Fenol-resorcinol-formaldeído (FRF)
		Emulsão polímero/isocianato
		Melamina-formaldeído (MF)
	Exterior Limitado	Melamina-uréia-formaldeído (MUF)
		Isocianato
		Epóxi
	Interior	Uréia-formaldeído (UF)
		Caseína
Semi-estrutural	Exterior Limitado	Polivinil acetato “crosslinking”
		Poliuretano
Não estrutural	Interior	Polivinil acetato (PVAc)
		Animal
		Soybean
		“Hot-melt”
		Amido

QUADRO 2 - CLASSIFICAÇÃO DO AMBIENTE DE USO DOS PAINÉIS DE MADEIRA CONFORME O TIPO DE ADESIVO

FONTE: Adaptado de *FOREST PRODUCTS LABORATORY* (1999¹²) *apud* PRATA (2010, p. 33).

Através de uma escala de resistência e durabilidade em condições externas referenciada por Nock e Richter (1978)¹³ *apud* Prata (2010, p. 34), o adesivo resorcinol-fomaldeído (RF) apresentou melhor resultado, seguido do Fenol-resorcinol-formaldeído (FRF), Fenol-formaldeído (FF), Epóxi, Melamina-formaldeído (MF), Melamina-uréia-formaldeído (MUF), Uréia-formaldeído (UF), Polivinil acetato (PVAc), dentre outros.

Entretanto, para que o resultado final de colagem seja eficiente e resistente, o adesivo deve apresentar a capacidade de transferir tensões de um substrato para o outro, sem perder sua coesão, sua resistência. Segundo as normas técnicas internacionais, a resistência (durabilidade) dos adesivos para madeira é classificada

¹² FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook:** wood as engineering material. Madison, USA, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. 463p.

¹³ NOCK, H. P.; RICHTER, H. G. **Adesão e adesivos – adesivos e sua aplicação na indústria madeireira.** Tópicos de tecnologia da madeira. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1978, 94p.

de acordo com a sua resistência a umidade e/ou água (HAUBRICH *et al.*, 2007¹⁴ *apud* PRATA, 2010, p. 33).

2.3.1.1 Painel compensado multilaminado

O compensado é um painel composto de camadas delgadas de lâmina de madeira, normalmente em número ímpar de lâminas (elevando sua estabilidade dimensional), coladas entre si com um adesivo. Cada camada é colada de forma que a direção da grã¹⁵ esteja em ângulos retos em relação à camada adjacente, o que se denomina de laminação cruzada (REVISTA DA MADEIRA, 2009).

As camadas podem ser constituídas de uma única lâmina ou duas ou mais lâminas, desde que suas grãs estejam paralelas. Entretanto, um painel pode conter um número ímpar ou par de lâminas, porém sempre um número ímpar de camadas. As lâminas podem variar no número, na espessura, na espécie e na classe de madeira. A alternância do sentido da grã nas camadas adjacentes confere ao painel compensado estabilidade dimensional em sua largura (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999), obtém-se um produto mais aproximadamente isotrópico que a madeira maciça (PFEIL W.; PFEIL M., 2008, p. 12), e ainda, o direcionamento cruzado das fibras também proporciona a uniformidade das propriedades mecânicas nas duas direções do plano do painel (BORTOLETTO JÚNIOR; GARCIA, 2004). Segundo Tsoumis¹⁶ (1991) *apud* Bortoletto Jr. e Garcia (2004), essa uniformidade é maior quanto maior for o número de camadas do compensado, em razão da melhor distribuição das tensões que se desenvolvem em face de determinado carregamento.

¹⁴ HAUBRICH, J. L. *et al.* **Adesivos vinílicos apresentam soluções para madeira.** Revista da Madeira, n.103, p.66-70, Curitiba, 2007.

¹⁵ Uma das propriedades organolépticas da madeira e refere-se à orientação geral dos elementos verticais constituintes do lenho em relação ao eixo da árvore (ou peças de madeira). Há uma grande variação natural no arranjo e direção dos tecidos axiais, originando vários tipos de grãs: grã direita e grãs irregulares (grã espiral, grã ondulada, grã inclinada, dentre outras) (BURGER; RICHTER, 1991, p. 43).

¹⁶ TSOUMIS, G. **Science and technology of wood: structure, properties, utilization.** New York: Chapman & Hall, 1991. p. 309-339.

Pode-se observar na seção de uma peça de madeira compensada ilustrada na FIGURA (16), onde a primeira, a terceira e a quinta camada apresentam as grãs na direção longitudinal, e as camadas intermediárias possuem as grãs na direção transversal.

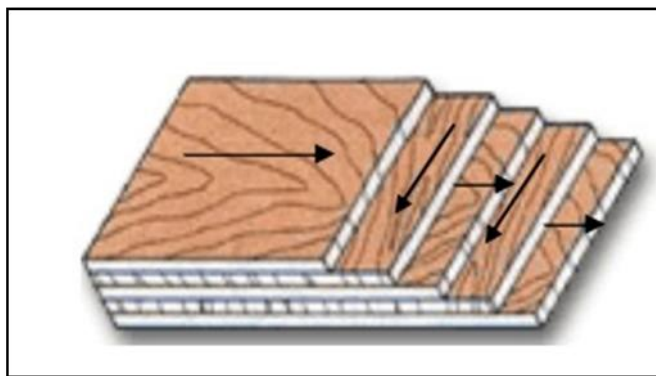


FIGURA 16 - ILUSTRAÇÃO DA MONTAGEM DE UM COMPENSADO DE CINCO LÂMINAS
FONTE: PRATA (2006, p. 10).

2.3.1.1.1 Processo de fabricação

A produção do compensado inicia-se com a seleção de árvores na floresta, analisando-se principalmente o diâmetro e a forma do fuste. As unidades escolhidas são transformadas em toras, em seguida descascadas, aquecidas e laminadas.

Na laminação as lâminas são submetidas à secagem. Para a formação do compensado, as lâminas são coladas sobrepostas e pré-prensadas a frio para facilitar as operações de carregamento e melhorar a distribuição do adesivo nas lâminas, antes da prensagem a quente. Posteriormente ocorre a prensagem a quente, onde os painéis seguem uma sequência de operações de acabamento, como: acondicionamento, esquadrejamento, calibração e lixamento, para posterior classificação e armazenagem (ABIMCI, 2009).

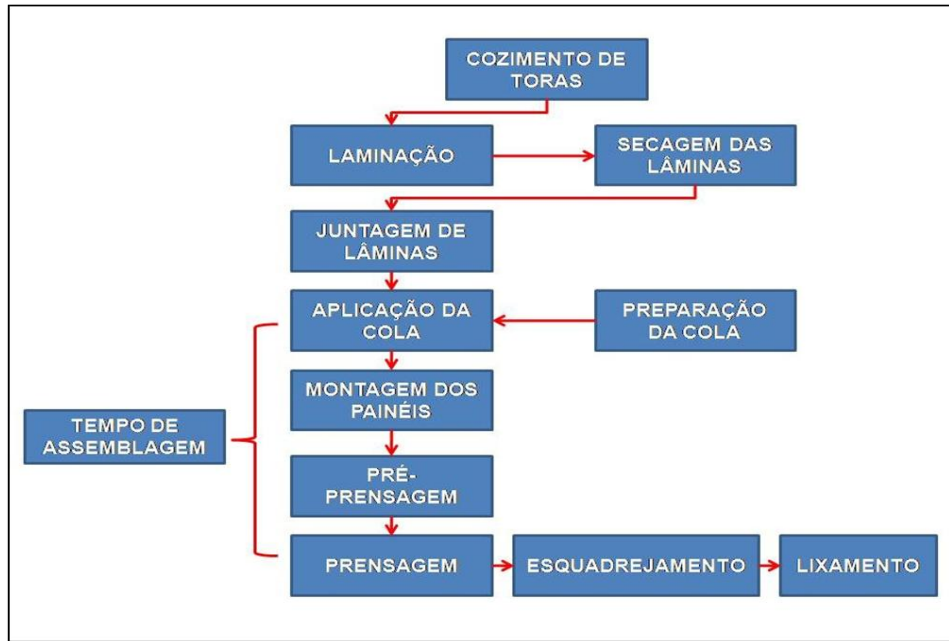


FIGURA 17 - ETAPAS DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE COMPENSADOS MULTILAMINADOS
 FONTE: Adaptado de PRATA (2006, p. 11).

2.3.2 Propriedades físicas e mecânicas da madeira

O conhecimento das propriedades físicas e mecânicas da madeira é de grande importância devido às influências significativas que exercem no desempenho e na resistência da madeira utilizada estruturalmente. Essas propriedades da madeira podem variar muito, dentro de uma mesma espécie, dependendo do sítio (profundidade, fertilidade, estrutura do solo, dentre outros), tratamentos silviculturais, origem (florestas plantadas ou nativas), tipo de povoamentos, dentre outros.

2.3.2.1 Propriedades físicas da madeira

Dentre os principais fatores que influenciam nas características físicas da madeira, podem-se destacar:

- Espécie da árvore;
- O solo e o clima da região de origem da árvore;
- Fisiologia da árvore;
- Anatomia do tecido lenhoso;
- Variação da composição química, e
- Massa específica.

Desta forma, entre as características físicas da madeira, cujo conhecimento é importante para sua utilização como material para construção, destacam-se (PFEIL W.; PFEIL M., 2008, p. 04):

- Anisotropia da madeira: a madeira é um material anisotrópico, apresentando três direções principais, conforme mostra a FIGURA (18): longitudinal, radial e tangencial. Para importância prática, é necessário principalmente, o conhecimento na diferenciação das propriedades na direção das fibras principais (direção longitudinal) e na direção perpendicular às mesmas fibras.

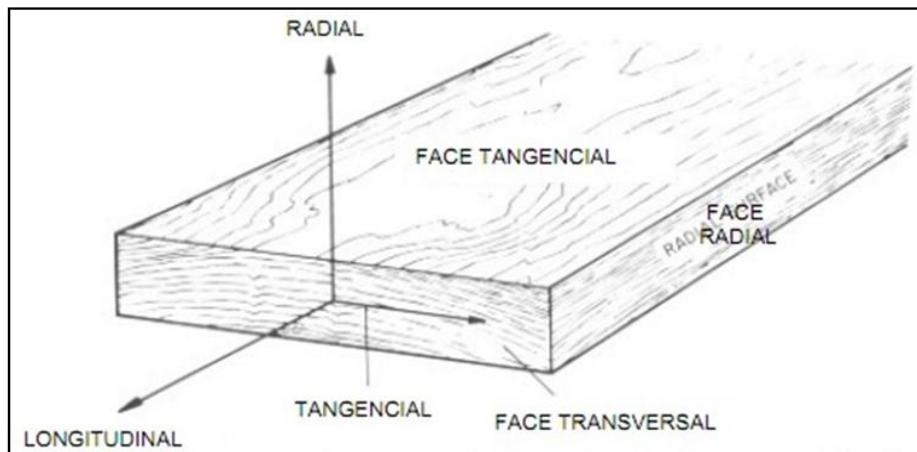


FIGURA 18 - EIXOS PRINCIPAIS DA MADEIRA EM RELAÇÃO À DIREÇÃO DAS FIBRAS
 FONTE: WILCOX *et al.* (1991)¹⁷ *apud* SZÜCS *et al.* (2008, p. 24).

¹⁷ WILCOX, W. W.; et al. **Wood as a building material**: a guide for designers and builders. John Wiley & Sons. New York, EUA, 1991. 215p. ISBN: 0-471-52722-10.

- Umidade: o teor de umidade (U) é o peso da água contido na madeira expresso como uma porcentagem do peso da madeira seca em estufa (p_s) (até a estabilização do peso):

$$U(\%) = \frac{p_i - p_s}{p_s} \quad (19)$$

onde:

U : Teor de umidade da madeira (%);

p_s : Peso da madeira seca em estufa (g), e

p_i : Peso inicial da madeira (g).

A quantidade de água das madeiras verdes ou recém-cortadas varia muito com as espécies e com a estação do ano. Entretanto, devido ao efeito da umidade nas outras propriedades da madeira, há um teor de umidade-padrão estabelecido. No Brasil, adota-se 12% como umidade-padrão de referência. Porém, devido à natureza higroscópica da madeira, o teor de umidade de uma peça em serviço varia continuamente, podendo haver variações diárias ou de estação.

- Variação dimensional da madeira: as madeiras sofrem retração ou inchamento com a variação de umidade, sendo esta variação dimensional aproximadamente linear. Entretanto, este fenômeno é mais significativo na direção tangencial, variando de 5% a 10% conforme as espécies. A retração radial é cerca da metade da direção tangencial. Já a direção longitudinal, a retração é menos pronunciada, valendo apenas 0,1% a 0,3%.

- Dilatação linear: o coeficiente de dilatação linear das madeiras na direção longitudinal varia de $0,3 \times 10^{-5}$ a $0,45 \times 10^{-5}$ por °C, sendo da ordem de 1/3 do coeficiente de dilatação do aço. Na direção tangencial ou radial, o coeficiente de

dilatação varia com o peso específico da madeira, sendo na ordem de $4,5 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ para madeiras duras¹⁸ e $8,0 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ para madeiras macias¹⁹.

- Deterioração da madeira: a madeira está sujeita à deterioração por diversas origens, dentre as quais se destacam:

- Ataque biológico (fungos, cupins, moluscos e crustáceos marinhos);
- Ação do fogo.

A vulnerabilidade da madeira de construção ao ataque biológico depende da camada do tronco de onde foi extraída (alburno é mais sensível à biodegradação do que o cerne); da espécie da madeira e das condições ambientais.

Importante salientar, que a madeira é um material inflamável, entretanto, queima rapidamente a camada superficial da peça e em seguida diminui consideravelmente a velocidade de propagação do fogo para o interior da mesma. Isto porque, com a formação de uma camada de carvão nessa parte externa, o acesso do oxigênio para o interior da peça fica bastante restrito e, conseqüentemente, a propagação do fogo perde a sua velocidade (SZÜCS *et al.*, 2006, p. 156).

As peças robustas de madeira, quando adequadamente projetadas e construídas, possuem excelente resistência ao fogo, oxidando lentamente devido à baixa condutividade de calor, guardando um núcleo de material íntegro (com propriedades mecânicas inalteradas) por longo período de tempo. Já as peças esbeltas de madeira e as peças metálicas das ligações requerem proteção contra ação de fogo. Através de tratamento químico pode-se aumentar a resistência da madeira aos ataques de agentes biológicos e do fogo. Este tratamento consiste em impregnar a madeira com preservativos químicos e retardadores de fogo (PFEIL W.; PFEIL M., 2008, p. 06).

¹⁸ Madeiras provenientes de árvores frondosas (dicotiledôneas, da classe Angiosperma, com folhas achatadas e largas), de crescimento lento, como peroba, ipê, carvalho, dentre outras; as madeiras duras de melhor qualidade são também chamadas de madeiras de lei (PFEIL W.; PFEIL M., 2008, p. 01).

¹⁹ Madeiras provenientes em geral das árvores coníferas (da classe Gimnosperma, com folhas em forma de agulhas ou escamas, e sementes agrupadas em forma de cones), de crescimento rápido, como pinheiro-do-paraná, pinheiro-bravo, dentre outros (PFEIL W.; PFEIL M., 2008, p. 01).

2.3.2.2 Propriedades mecânicas da madeira

Seguindo-se a norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997), são realizados ensaios padronizados determinando-se propriedades físicas e mecânicas das espécies de madeira. As amostras utilizadas são representadas com unidades sem defeitos, evitando-se a incerteza dos resultados obtidos com peças com defeito.

De acordo com esta norma, para a caracterização completa da madeira para uso em estruturas, as seguintes propriedades devem ser determinadas por meio de ensaios:

- Resistência à compressão paralela às fibras, e normal às fibras;
- Resistência à tração paralela às fibras, e normal às fibras;
- Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras;
- Resistência ao embutimento (pressão de apoio em ligações com conectores) paralelo e normal às fibras;
- Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras, e módulo de elasticidade na compressão normal às fibras, e
- Densidade básica: massa específica definida pela razão entre a massa seca e o volume saturado; e densidade aparente, calculada com a massa do corpo de prova a 12% de umidade.

As propriedades mecânicas obtidas com estes ensaios variam com o teor de umidade da amostra. Desta forma, é importante a determinação do teor de umidade do lote de madeira analisado, para posterior ajuste dos resultados obtidos nos ensaios à condição padrão de umidade ($U=12\%$) (PFEIL W.; PFEIL M., 2008, p. 27).

A partir dos ensaios padronizados obtêm-se as resistências características de peças sem defeitos referidas à umidade padrão. Segundo o mesmo autor, esses valores não representam as propriedades mecânicas da madeira serrada utilizada em estruturas, pois estas variam ainda com diversos fatores como:

- Teor de umidade: com o aumento da umidade, a resistência acaba diminuindo até ser atingido o ponto de saturação das fibras (30% de umidade), acima desse ponto a resistência mantém-se constante. Sendo que, acima do ponto de saturação das fibras, o volume e o peso específico da madeira não são influenciados pelo teor de umidade, resultando numa resistência praticamente constante. Entretanto, quando ocorre a secagem da peça abaixo do ponto de saturação das fibras, observa-se redução de volume, aumento do peso específico e da resistência.

- Tempo de duração da carga: a perda de resistência com o tempo de duração da carga pode ser encarada como um fenômeno de acumulação de danos, tal como na fadiga dos materiais sob cargas cíclicas, só que para ação de cargas permanentes (FOSCHI, 2000²⁰ *apud* PFEIL W.; PFEIL M., 2008, p. 36). A influência da umidade da madeira também é notável neste fenômeno, para uma mesma deformação, uma peça com maior teor de umidade terá sua vida útil reduzida em relação à outra peça de menor teor de umidade.

- Ocorrência de defeitos: os defeitos de textura apresentam grande influência na resistência das peças estruturais. Os nós têm efeito predominante na redução da resistência à tração, reduzindo também em menor escala as resistências à compressão e ao cisalhamento. Outros defeitos, por exemplo, decorrentes de secagem e decomposição, também reduzem a resistência.

Para maiores informações sobre os principais ensaios de madeira, recomenda-se Pfeil W. e Pfeil M. (2008, p. 27), como também, a NBR 7190 (ABNT, 1997) para os procedimentos dos ensaios.

²⁰ FOSCHI, R. O. **Reliability applications in wood design**. Progress in structural engineering and materials, vol.2, p. 238-246, John Wiley & Sons Ltd., UK, 2000.

2.3.2.2.1 Ensaio de tração e compressão

A relação entre a carga e a deformação de uma estrutura pode ser obtida por meio de diagramas que apresentam cargas e deflexões para cada elemento e para cada tipo de carregamento na estrutura, sendo esta relação, dependente das dimensões dos elementos e do tipo de material do qual são feitos (MORRIS, et al., 2003, p. 120).

A resistência de um material depende de sua capacidade de suportar uma carga sem deformação excessiva ou ruptura, sendo esta propriedade inerente ao próprio material, determinada por métodos experimentais. Segundo Hibbeler (2010, p. 57), um dos testes mais importantes nesses casos é o ensaio de tração ou compressão.

Para execução de um ensaio de tração ou compressão, prepara-se um corpo de prova do material com forma e tamanho padronizados. Os dados para os diagramas tensão-deformação são obtidos mediante a aplicação de uma carga axial a um corpo de prova e pela medição simultânea da carga e da deformação a cada instante. Desta forma, usa-se uma Máquina Universal de Ensaio (FIGURA 19) para deformar o corpo de prova a uma taxa lenta e constante, medindo a carga necessária para produzir a deformação (HIBBELER, 2010, p. 57).



FIGURA 19 - MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS MODELO DL 30000
FONTE: EMC (2011).

Assim, dados de carga aplicada no ensaio são lidos pela máquina de ensaios em intervalos frequentes. Entretanto, o alongamento entre as marcas no corpo de prova pode ser medido por meio de um calibre ou por um dispositivo mecânico ou ótico denominado extensômetro (FIGURA 20) (HIBBELER, 2010, p. 57). É possível também, a partir de um extensômetro de resistência elétrica, obter a deformação diretamente.

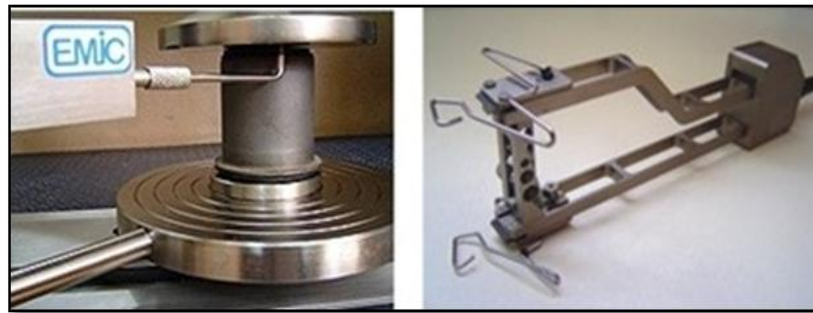


FIGURA 20 - EXTENSÔMETROS
FONTE: EMIC (2011).

Este equipamento baseia-se na variação da resistência elétrica em um arame muito fino ou uma lâmina delgada de metal sob deformação. Desta forma, sendo acoplado ou colado ao corpo de prova em uma direção específica, passando a ser parte integrante do mesmo, sofrendo a mesma deformação.

2.3.2.2.2 Diagrama tensão-deformação

Através de dados obtidos em um ensaio de tração ou compressão, podem-se calcular vários valores da tensão e da deformação correspondentes ao material testado, construindo-se um gráfico com esses resultados. A curva resultante é denominada diagrama tensão-deformação.

Utilizando-se dos dados registrados, pode-se determinar a tensão nominal, σ , (EQUAÇÃO (01), item 2.1), ou seja, dividindo-se a força aplicada (F) pela área

da seção transversal do corpo de prova, como também, a deformação específica axial média (ε_{med}), (EQUAÇÃO (07), item 2.1.2), ou seja, dividindo-se a deformação axial (ε_n) pelo comprimento (L) do corpo de prova. A partir destes valores pode-se construir um gráfico, no qual a ordenada é a tensão e a abscissa é a deformação, sendo a curva resultante o diagrama tensão-deformação.

Esse diagrama é muito utilizado na Engenharia, pois proporciona os meios para obtenção de dados sobre a resistência à tração ou à compressão de um material sem considerar o tamanho ou a forma física do material, isto é, sua geometria. Quando são analisados dois diagramas tensão-deformação do mesmo material, estes nunca serão exatamente iguais, visto que os resultados dependem de variáveis como a composição e as imperfeições microscópicas do material, seu modo de fabricação e a taxa de carga e temperatura utilizadas durante o ensaio (HIBBELER, 2010, p. 58).

Algumas relações apresentadas nos diagramas tensão-deformação possuem uma base teórica (por exemplo, uma relação linear entre tensão e deformação para pequenas deformações), outras são adequações puramente empíricas aos dados experimentais. Porém, em qualquer caso, os valores das constantes específicas para os vários materiais devem ser determinados experimentalmente (MORRIS, *et al.*, 2003, p. 121).

2.3.2.2.2.1 Módulo de elasticidade

A maioria dos materiais utilizados em estruturas de engenharia formam uma linha reta na parte inicial do diagrama tensão-deformação. Ou seja, a tensão é proporcional à deformação, então, o material é linearmente elástico (FIGURA 21), esta relação é chamada de Módulo de Elasticidade. Alguns materiais podem mostrar uma leve curvatura, mesmo para tensões pequenas, porém é comum representá-la como uma linha reta para os dados médios da primeira parte do diagrama e ignorar a curvatura.

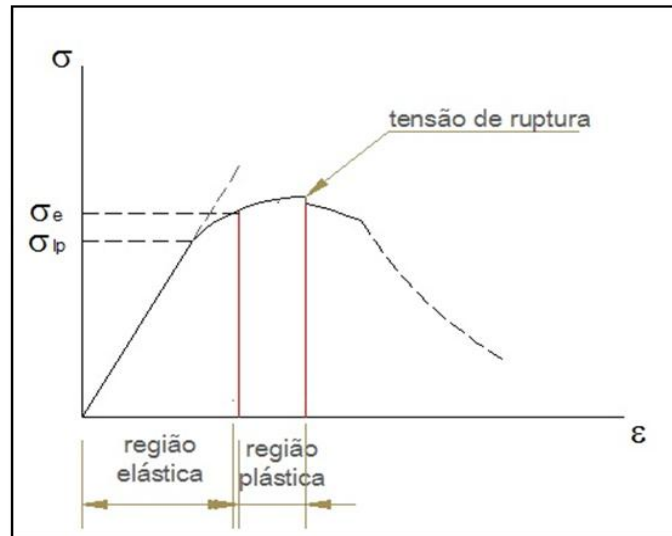


FIGURA 21 - DIAGRAMA TENSÃO-DEFORMAÇÃO PARA A MADEIRA
 FONTE: Adaptado de MARTINS (2010, p.05).

O limite superior da tensão para esta relação linear é denominado limite de proporcionalidade (σ_p), após o qual a deformação continua a aumentar, entretanto, não sendo mais proporcional ao carregamento. Desta forma, se a tensão ultrapassar ligeiramente o limite de proporcionalidade, o material ainda pode responder de maneira elástica até o limite de elasticidade (σ_e), sendo que, se removida a tensão o corpo de prova ainda voltará a sua forma original.

A partir do limite de elasticidade, se houver aumento de tensão, o material assume o comportamento plástico. Ou seja, resultará no colapso do material e desta forma, deformando-o permanentemente.

Segundo Hibbeler (2010, p. 59), durante todo o ensaio, enquanto o corpo se alonga, sua seção transversal diminui. Sendo que, esta redução é razoavelmente uniforme por todo o comprimento de referência do corpo de prova.

Na última etapa, como a área da seção transversal estará diminuindo, consequentemente, a capacidade de suportar cargas também estará decrescendo. Por consequência, o diagrama tensão-deformação tende a curvar-se para baixo até o material romper, atingindo a tensão de ruptura (σ_{rup}).

2.3.3 Ensaios não destrutivos

Segundo a Associação Brasileira de Ensaios Não destrutivos e Inspeção (ABENDI, 2011), os ensaios não destrutivos (END) são técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos sem danificá-los, sendo executados nas etapas de fabricação, construção, montagem e manutenção. São largamente utilizados nos setores petróleo/petroquímico, químico, aeronáutico, aeroespacial, siderúrgico, naval, eletromecânico, papel e celulose, dentre outros.

A importância de se desenvolver um ensaio não destrutivo está na possibilidade de verificação da existência ou não de descontinuidades ou defeitos, de modo a não alterar as características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais do material. Ou seja, tornando-se viável o uso posterior do material analisado.

Entretanto, para que os resultados dos ENDs sejam eficazes e confiáveis deve-se levar em consideração os seguintes componentes (ABENDI, 2011):

- Pessoal treinado, qualificado e certificado;
- Equipamentos calibrados, e
- Procedimentos de execução de ensaios qualificados com base em normas e critérios de aceitação previamente definidos e estabelecidos.

Os métodos mais utilizados nos ENDs são o ultra-som, radiografia, correntes parasitas, análise de vibrações, emissão acústica, entre outros. Geralmente, os testes de vibrações e ultra-som são empregados para avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos materiais.

Em estudos de estruturas de madeira, a detecção de defeitos e descontinuidades são problemas característicos do material, onde os ensaios não destrutivos são usados para verificar como essas ocorrências afetam as suas características físicas e mecânicas (TARGA *et al.*, 2005).

A determinação não destrutiva de grandezas físico-mecânicas é relacionada com a resistência e a deformabilidade do elemento em estudo, visto que o objetivo é atribuir uma análise do qual a inspeção visual se revela insuficiente. A inspeção

visual é o principal método de inspeção e diagnóstico para estruturas de madeira. Consiste em examinar diretamente o elemento, observando e registrando todos os sinais indicadores de anomalias, defeitos, ataques, dentre outros.

Dentre as diversas técnicas utilizadas para ensaios não destrutivos em madeira, os mais utilizados em pesquisas científicas são (ROSS; PELLERIN, 1994²¹ *apud* TARGA *et al.*, 2005):

- Técnica de flexão estática: consiste na medição estática do módulo de elasticidade (MOE) na flexão de um exemplar de madeira, sendo o princípio básico de funcionamento da máquina de classificação da madeira serrada. MSR – *Machine Stress Rating*;
- Técnica da vibração transversal (*transverse vibration technique or resonance technique*): consiste na análise da vibração de um exemplar de madeira, com obtenção do módulo de elasticidade do material a partir da análise das frequências principais de vibração;
- Técnica das ondas de tensão (*stress wave method*): consiste na aplicação de uma onda de tensão (impacto) no material e análise do fenômeno de propagação desse estímulo. A velocidade de propagação de uma onda de tensão induzida e sua atenuação no material são os principais parâmetros analisados nesses casos;
- Técnica da propagação de ondas de ultra-som: diversos institutos de pesquisa têm voltado suas atenções para as técnicas das ondas acústicas (*Acoustic emission – AE*) e ultra-sônicas (*Acousto-ultrasonic emission – AU*), ambas tem se mostrado eficientes para determinados propósitos, como, por exemplo, a avaliação da orientação da grã na madeira.

²¹ ROSS, R. J.; PELLERIN, R.F. **Nondestructive testing for assessing wood members in structures**. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1994, 40 p.

Em geral, os ensaios são aplicados em elementos estruturais, principalmente nos casos em que se queiram analisar a segurança estrutural e realizar um projeto de eventuais soluções de conservação ou reforço para a estrutura. São muito comuns em recuperações de prédios históricos e artísticos, de pontes antigas, dentre outros, tentando visar a recuperação dos mesmos, e não, a substituição.

Segundo Feio e Lourenço (2005), o diagnóstico de um elemento de madeira pertencente a uma estrutura inclui os seguintes aspectos:

- Avaliação da qualidade da madeira (espécie, principais características do elemento, defeitos e anomalias presente no tronco originário);
- Avaliação de eventuais alterações e danos (de agentes biológicos ou de outras causas) no elemento, depois de implantado em obra;
- Determinação da seção resistente atual;
- Determinação de características físico-mecânicas relevantes, como a umidade, massa específica e o módulo de elasticidade, e
- Realização de ensaios, sobretudo com recurso a técnicas não-destrutivas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atender aos objetivos deste trabalho, dividiu-se a metodologia em duas etapas:

- Etapa I – Verificação e análise da eficácia dos adesivos refletores e da estação total para o trabalho pretendido:

- Primeiro Experimento: Calibração dos alvos, e
- Segundo Experimento: Verificação dos alvos refletores para utilização em visadas oblíquas.

A importância da divisão da metodologia em duas partes está, principalmente, ligada ao resultado que a estação total em conjunto com os adesivos refletores poderia fornecer em relação à situação prevista para o desenvolvimento do monitoramento geodésico na Etapa II, simulada nessa Etapa I.

- Etapa II – Execução dos ensaios de flexão estática em conjunto com o monitoramento geodésico de painéis compensados de madeira. Sendo que, realizou-se o monitoramento geodésico em três fases:

- Primeira Fase: corpo de prova sem carga (estático), ou seja, antes de iniciar o ensaio estrutural;
- Segunda Fase: corpo de prova na primeira paralisação da máquina de ensaios (deformação de aproximadamente 1,5 mm), e
- Terceira Fase: corpo de prova na segunda paralisação da máquina de ensaios (deformação de aproximadamente 3,5 mm).

Desta forma, na Etapa II desenvolveu-se o monitoramento geodésico, através do método de irradiação tridimensional, de pontos pré-determinados em

corpos de prova de painéis compensados de madeira durante os ensaios de flexão estática realizado com a Máquina Universal de Ensaios (FIGURA 22).



FIGURA 22 - ASPECTO DA INSTALAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS PARA REALIZAÇÃO DOS ESTUDOS NO LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA DA MADEIRA – ETAPA II
FONTE: O autor (2012).

3.1 ETAPA I - VERIFICAÇÃO E ANÁLISE DA EFICÁCIA DOS ADESIVOS REFLETORES E DA ESTAÇÃO TOTAL

Realizou-se a primeira etapa deste trabalho no Laboratório de Instrumentação Geodésica – LAIG, localizado no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná.

Desde 1990, o Laboratório de Instrumentação Geodésica vem desenvolvendo atividades nas mais diversas áreas da geodésia. Dispõem de equipamentos para a realização dessas atividades, como estações totais, níveis digitais, GPS, altímetros, barômetros, dentre outros. Dispõe também de uma base para aferição de miras verticais de invar e trenas, possibilitando o estudo do coeficiente de dilatação linear

dos materiais. Desta forma, o Laboratório vem desenvolvendo pesquisas e trabalhos envolvendo a geodésia aplicada, tais como:

- ✓ Auscultação de barragens;
- ✓ Automação de levantamentos geodésicos;
- ✓ Topografia e controle industrial;
- ✓ Monitoramento de Estruturas, e
- ✓ Instrumentação geodésica.

3.1.1 Definição do equipamento

Definiu-se o equipamento a utilizar, fundamental para os resultados do trabalho, mediante a disponibilidade no Laboratório – LAIG, como também, ao trabalho pretendido e a precisão almejada. Desta forma, optou-se em utilizar a Estação Total TC2003 da Leica (FIGURA 23), cuja precisão angular é de $\sigma_a = \pm 0,5''$ (meio segundo de arco) e na medida linear é $\sigma = \pm(1\text{mm} + 1\text{ppm})$ (LEICA, 2006), classificada segundo a NBR 13133 (ABNT, 1994), como uma estação de alta precisão.



FIGURA 23 - ESTAÇÃO TOTAL TC2003 – LEICA
FONTE: O autor (2012).

A TC2003 é um equipamento adequado, especialmente, para aplicações de engenharia, construções de túneis, monitoramento contínuo permanente ou para controlar máquinas. O monitoramento pode ser realizado tanto em construções e estruturas existentes, como naquelas que estão ainda em construção. Como exemplos, têm-se o monitoramento de barragens, comportamento e medições de cargas em pontes, deslocamentos, dentre outros.

Entretanto, este equipamento necessita de prismas refletores ou de adesivos refletores para a realização das mensurações. Porém, para o desenvolvimento deste trabalho (Etapa II) seria inviável a utilização de prismas refletores, pois os mesmos apresentam um tamanho muito grande em relação aos pontos monitorados nos painéis estruturais. Mesmo utilizando-se de mini-prismas, esses ainda apresentariam tamanho elevado, incrustando também, um peso a mais sobre os ensaios. Desta forma, foi necessária a aquisição de alvos fabricados com fita adesiva refletora (FIGURA 24), apresentando-se como uma ótima alternativa para este trabalho. Além de ser uma opção mais barata em relação aos prismas de vidro ou de acrílico, não embutirão um peso a mais aos ensaios.

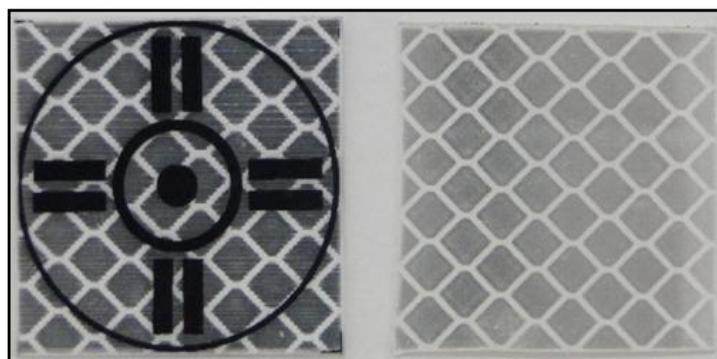


FIGURA 24 - ALVO FABRICADO COM FITA ADESIVA REFLETORA 3M
FONTE: O autor (2012).

Os alvos utilizados apresentam uma dimensão de 30 mm x 30 mm. Entretanto, para todo o desenvolvimento do trabalho definiu-se um ponto específico no alvo refletor para realização das visadas, conforme pode ser analisado na FIGURA (25). Visto que, o ponto central do alvo tem um diâmetro muito grande, induzindo a diferentes posicionamentos do retículo.



FIGURA 25 - ASPECTO DO PONTO DE VISADA DEFINIDO NOS ALVOS REFLETORES
FONTE: O autor (2012).

3.1.2 Primeiro experimento: calibração dos alvos

A partir da definição da estação total a ser utilizada, iniciou-se uma verificação e análise do equipamento e dos adesivos refletores no escopo do trabalho proposto.

Adaptou-se uma viga de madeira, escolhida aleatoriamente, apenas para proporcionar os testes de visadas perpendiculares aos alvos refletores através do Método de Irradiação (FIGURA 26). Ou seja, em nenhum momento deste primeiro experimento foram analisadas propriedades estruturais.



FIGURA 26 - ASPECTO DO PRIMEIRO EXPERIMENTO PARA CALIBRAÇÃO DOS ALVOS
FONTE: O autor (2012).

Determinou-se uma orientação em relação ao sistema de referência (ponto R1) (FIGURA 26), importante para o processo de determinação de coordenadas tridimensionais, pois a partir dessa direção de referência que o processo de mensuração por irradiação pôde ser desempenhado. Neste caso, como o objetivo não seria avaliar a viga estruturalmente, e sim, somente a relação das coordenadas entre os pontos, o transporte do sistema de referência para a própria viga não foi efetuado.

Definiram-se cinco pontos ao longo da viga de madeira onde foram colados os adesivos refletivos para o monitoramento, conforme espaçamentos apresentados pelo dimensionamento do corpo de prova seguindo a norma técnica europeia EN 789 (CEN, 2004), utilizada nos experimentos previstos para a Etapa II.

Entretanto, neste experimento foram avaliados apenas os três pontos centrais (P2, P3 e P4), sendo esses, os únicos pontos utilizados para o cálculo da flecha de deslocamento nos ensaios estruturais mensurados pela estação total na Etapa II. A distância entre esses três pontos foi medida inicialmente com o auxílio de um paquímetro, posteriormente comparando-se com as mensurações efetuadas com a estação total.

A partir da disposição dos pontos, foram realizadas três séries de observações com leituras apenas em posição direta, visto que seria apenas um teste

inicial, mediante ao resultado da estação total e dos adesivos refletos com visadas abaixo da linha do horizonte.

De posse das distâncias inclinadas, dos ângulos horizontais e ângulos zenitais para cada ponto, possibilitou calcular as coordenadas dos três pontos (P2, P3 e P4) e, posteriormente, a distância espacial entre eles, utilizando-se as EQUAÇÕES (09), (10), (11) e (12) (item 2.2.1.1.1), considerando-se $X_0 = 0\text{ m}$; $Y_0 = 0\text{ m}$ e $Z_0 = 0\text{ m}$.

Para estudo de propagação de variâncias em um projeto de levantamentos, adota-se o preconizado por Chrzanowski (1977), a tolerância (erro máximo admissível) igual a 3σ (desvio padrão), equivalente à probabilidade normal de 99,9%. Conforme o equipamento utilizando, a tolerância angular passa a ter 1,5" e a tolerância linear para $\pm (3\text{mm} + 3\text{ppm})$.

Desta forma, para verificar se os valores das distâncias obtidas com a estação total são coerentes com as obtidas com o paquímetro, aplicou-se o teste estatístico t de *Student* para os valores médios das distâncias entre as três séries de observações. Desta forma, formulou-se uma hipótese nula e consequentemente, uma hipótese alternativa.

Hipótese $H_0 : \bar{x}_1 = \bar{x}_2$ (intervalo de aceitação)

Hipótese Alternativa $H_1 : \bar{x}_1 \neq \bar{x}_2$ (rejeição da hipótese nula)

onde:

\bar{x}_1 : Média das distâncias mensuradas com a estação total, e

\bar{x}_2 : Média das distâncias mensuradas com o paquímetro.

Fixou-se o nível de significância (α), obtendo o valor da variável t através da tabela de distribuição t de *Student*. Efetuou-se o cálculo do número de graus de liberdade, conforme a EQUAÇÃO (20).

$$\varphi = (n_1 + n_2 - 2) \quad (20)$$

onde:

φ : Número de graus de liberdade da soma das duas médias populacionais;

n_1 : Número de observações da primeira amostra, e

n_2 : Número de observações da segunda amostra.

Posteriormente, calculou-se o valor da variável t :

$$t_{CAL} : \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{\sigma_c \cdot \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 \cdot n_2}}} \quad (21)$$

onde:

t_{CAL} : Valor calculado de t ;

\bar{x}_1 : Média das observações da primeira amostra (estação total);

\bar{x}_2 : Média das observações da segunda amostra (paquímetro), e

σ_c : Desvio padrão comum.

$$\sigma_c : \sqrt{\frac{(n_1 - 1) \cdot S_1^2 + (n_2 - 1) \cdot S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (22)$$

onde:

S_1^2 : variância da primeira amostra, e

S_2^2 : variância da segunda amostra.

Desta forma, puderam-se comparar as distâncias entres os pontos obtidos com a estação total com as distâncias medidas com o paquímetro, avaliando-se a mensuração da estação total.

3.1.3 Segundo experimento: verificação dos alvos refletores para utilização em visadas oblíquas

Utilizando-se do mesmo método, dos mesmos procedimentos e determinações do primeiro experimento, desenvolveu-se também o segundo experimento. Entretanto, neste segundo experimento realizou-se uma análise de resposta da estação total e dos adesivos refletores para visadas com ângulo de incidência diferente de 90° (FIGURA 27).

Desta forma, os testes foram realizados girando-se a viga sobre o tripé, de modo a obter com a estação total visadas de 30° , 45° e 60° .



FIGURA 27 - ASPECTO DO SEGUNDO EXPERIMENTO REALIZADO COM VISADAS OBLÍQUAS
FONTE: O autor (2012).

A princípio, como não se obteve resposta nas medidas de distâncias efetuadas, cogitou-se a ideia de utilizar algum anteparo que permitisse as visadas dos adesivos refletores nos respectivos pontos pré-determinados, independente da posição da viga de madeira, estando posicionada no sentido transversal ou longitudinal.

Desta forma, optou-se em utilizar dois materiais para o teste:

- Abraçadeiras de aço, e
- Cantoneira 1" (30 mm).

A proposta das abraçadeiras de aço surgiu mediante a facilidade de poder manusear as mesmas, modificando a sua inclinação em relação à viga de madeira. Entretanto, como essa inclinação não seria de forma constante em todos os alvos, cogitou-se a ideia da utilização de pequenas cantoneiras, devido ao fato de seu formato ser fixo, não oscilando o ângulo de inclinação em relação à viga. Ambos os anteparos, apesar da inclinação, mantiveram-se fixos na viga durante todo o experimento. Nas FIGURAS (28) e (29) pode-se visualizar a disposição dos anteparos na viga durante o experimento.

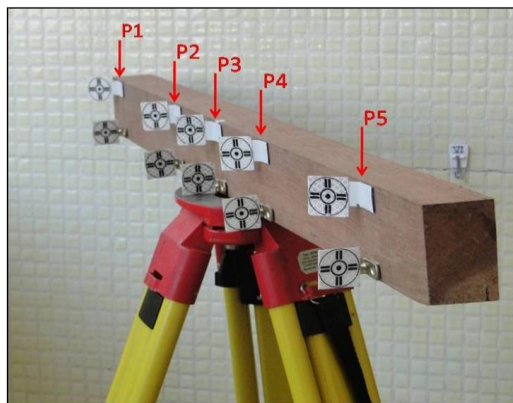


FIGURA 28 - ASPECTO DA DISPOSIÇÃO DOS ANTEPAROS NA VIGA
FONTE: O autor (2012).

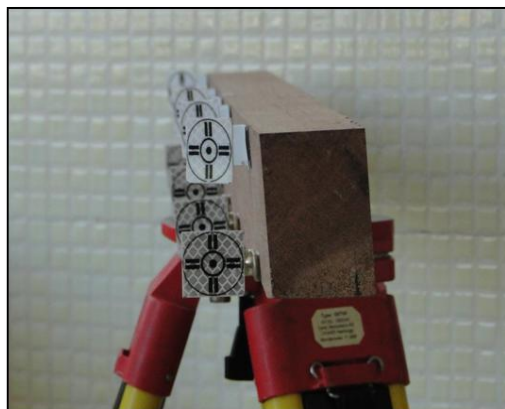


FIGURA 29 - ASPECTO DA DISPOSIÇÃO DOS ANTEPAROS NA VIGA
FONTE: O autor (2012).

Neste experimento foram monitorados os cinco pontos definidos ao longo da viga, conforme espaçamentos apresentados pelo dimensionamento do corpo de prova seguindo a norma técnica europeia EN 789 (CEN, 2004), utilizada nos experimentos previstos para a Etapa II.

A partir da disposição dos pontos, realizaram-se três séries de observações com leituras em posição direta e inversa da luneta, com o intuito de testar a viabilidade de aplicação destes anteparos, conforme situação mostrada na FIGURA (30).



FIGURA 30 - ASPECTO DO EXPERIMENTO REALIZADO COM OS ANTEPAROS
FONTE: O autor (2012).

Com as leituras realizadas, pôde-se então, efetuar os cálculos das coordenadas utilizando-se as EQUAÇÕES (09), (10) e (11) (item 2.2.1.1.1), considerando-se $X_0 = 0\text{ m}$; $Y_0 = 0\text{ m}$ e $Z_0 = 0\text{ m}$.

Neste caso, foram avaliadas as distâncias espaciais (EQUAÇÃO 12, item (2.2.1.1.1)) entre os pontos, como também, as diferenças entre as coordenadas para cada série. Analisando-se assim, a precisão das coordenadas entre as três séries de observações.

3.2 PARTE II – ENSAIOS DE FLEXÃO ESTÁTICA E MONITORAMENTO GEODÉSICO DE PAINÉIS COMPENSADOS DE MADEIRA

3.2.1 Local do trabalho

Esta etapa do trabalho foi desenvolvida no Laboratório de Tecnologia da Madeira, localizado no Setor de Ciências Agrárias na Universidade Federal do Paraná, em virtude deste laboratório ser acreditado, reconhecido pelo INMETRO, desenvolvendo atividades voltadas à pesquisa, ensino, assessoria e realizar sistematicamente ensaios padronizados na área madeireira. Dentre estas atividades podem-se citar:

- ✓ Caracterização tecnológica de madeiras tropicais, nativas e reflorestadas;
- ✓ Avaliação de potencialidade de usos de novas espécies de madeiras nativas e exóticas;
- ✓ Avaliação de conformidade de produtos de madeira, sob critérios de normas nacionais e internacionais (ABNT, ASTM, EN);
- ✓ Desenvolvimento de novos produtos à base de madeira (móveis, estruturas e painéis);
- ✓ Ensaios não destrutivos para caracterização de propriedades de madeiras;
- ✓ Cursos sobre as propriedades da madeira e tecnologias de utilização, e
- ✓ Treinamento e capacitação técnica para laboratórios de ensaios de madeira.

3.2.2 Definição do material e do ensaio estrutural

Com a viabilidade de realizar a parte observacional neste Laboratório, pôde-se definir o material a ser monitorado e os procedimentos do ensaio estrutural.

A escolha de painéis compensados de madeira ocorreu devido às diversas características favoráveis, principalmente, pela sua alta aplicação no setor da construção civil e suas vantagens de utilização em relação à madeira sólida, tais como (PRATA, 2006, p. 05):

- O rendimento da tora na laminação é maior que no desdobro da madeira serrada;
- Com o princípio da disposição das lâminas de forma cruzada, há uma diminuição da anisotropia da madeira no compensado em relação à madeira serrada;
- A resistência se apresenta de forma mais ou menos uniforme em toda a extensão do painel;
- Os painéis compensados podem ser fabricados em grandes dimensões dependendo das dimensões das prensas, e
- Consumo mundial do produto como utilização em formas de concreto.

Além disso, buscava-se também, um corpo de prova e um ensaio estrutural padronizado que pudesse ser avaliado por um determinado período de tempo após aplicações de carga, possibilitando a realização do método geodésico, de forma que o tempo necessário para realizar as irradiações tridimensionais não comprometesse o ensaio estrutural. Muitos ensaios padronizados seguem, além de definições das dimensões dos corpos de prova, um tempo específico de intervalos de cargas. Desta forma, o ensaio de flexão estática mostrou-se satisfatório para atender inicialmente os requisitos necessários para realização do monitoramento geodésico, sem comprometer o resultado final do ensaio estrutural.

No presente estudo, utilizaram-se painéis compensados do gênero *Pinus spp.*, disponibilizados pelo Laboratório de Tecnologia da Madeira. Optou-se por compensados do gênero *Pinus spp.*, devido a grande predominância no mercado

tanto nacional como, principalmente, internacional. Desta forma, foram escolhidos aleatoriamente sete corpos de prova para testar e comparar os resultados, sendo todos compostos de cinco camadas coladas com adesivo fenólico (fenol formaldeído), propício para uso externo (FIGURA 31). Apresentando uma espessura nominal de 18 mm, largura de 300 mm e o comprimento de 976 mm. Este tipo de painel é caracterizado conforme sua fabricação como de uso estrutural.



FIGURA 31 - PAINÉIS COMPENSADOS DE PINUS
FONTE: O autor (2012).

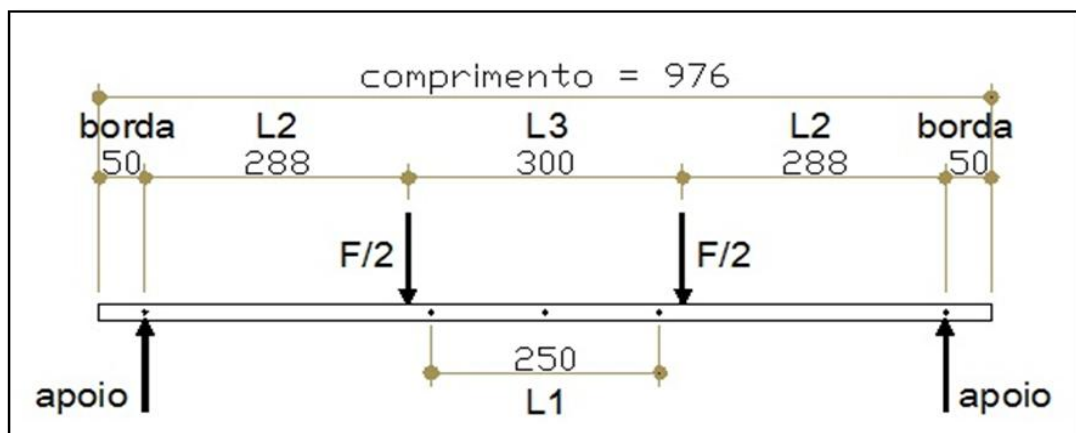
3.2.3 Ensaio estrutural

Normalmente, os ensaios são realizados conforme as normas específicas para o destino (país) do produto final. Em se tratando de painéis multilaminados, o Brasil apresenta maior exportação do que o consumo interno, destinando-se assim, grande parte de sua produção para o mercado europeu, sendo atestada sua qualidade baseado em critérios estabelecidos pela norma europeia CEN (*European Committee For Standardization*). Devido a isso, o ensaio estrutural de flexão estática realizado seguiu a norma europeia EN 789 (CEN, 2004), efetuando-se a determinação das propriedades mecânicas de flexão estática apenas no sentido paralelo em relação às fibras de lâmina de capa do painel.

Os corpos de prova testados foram definidos e produzidos segundo a forma e o tamanho padrão para este tipo de ensaio, conforme apresentado no QUADRO (3). O posicionamento dos corpos de prova na máquina de ensaios segue os padrões ilustrados na FIGURA (32), sendo que a distância entre os pontos de carga e os apoios, L_2 , apresenta 16 vezes a espessura nominal (18 mm), não mais que 400 mm e nem menos que 240 mm ($\sigma = \pm 1$ mm).

ESPESSURA	18 mm
LARGURA	300 mm
COMPRIMENTO	976 mm

QUADRO 3 - DIMENSIONAMENTO DOS CORPOS DE PROVA DE COMPENSADOS PARA ENSAIOS ESTRUTURAIS
FONTE: Adaptado de EN 789 (CEN, 2004).



*Dimensionamento em milímetros.

FIGURA 32 - DIMENSIONAMENTO DO CORPO DE PROVA PARA ENSAIOS DE FLEXÃO ESTÁTICA ESTRUTURAL
FONTE: O autor (2012).

onde:

L_1 : Vão de medição da deformação e/ou deslocamento (mm);

L_2 : Distância entre os apoios e a aplicação de carga (mm);

L_3 : Distância entre os pontos de aplicações de carga (mm), e

F : Força/carga aplicada (N).

Realizaram-se os ensaios em uma Máquina Universal de Ensaio, marca EMIC, com capacidade de 30.000 kgf (300 kN) (FIGURA 33), o qual fornece informações de carga aplicada e suas respectivas deformações a uma velocidade constante. O registro da carga é realizado através de uma célula de carga e, para o registro da deformação do corpo de prova, utilizou-se um extensômetro (FIGURA 34) (tecnicamente, também chamado de deflectômetro eletrônico, precisão de 0,001 mm) fixado no corpo de prova com auxílio de um *yoke*²² de 250 mm ($L1$). A medição da deformação máxima realizada pelo extensômetro foi de 3,5 mm, sendo esta medida suficiente para se obter as leituras de carga e deformação nos corpos de prova, ainda na fase elástica, para o cálculo do módulo de elasticidade.

Após o ensaio, a máquina de ensaios fornece o tempo (s), a deformação (mm) e a força (N) para todo o procedimento do ensaio para cada corpo de prova.



FIGURA 33 - MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS
FONTE: O autor (2012).

²² Consiste numa haste metálica horizontal apoiada nas extremidades, onde é fixado o extensômetro para aquisição de dados onde se registram as leituras de deformações verticais.



FIGURA 34 - EXTENSÔMETRO
FONTE: O autor (2012).

3.2.3.1 Determinação do módulo de elasticidade (E) à flexão estática adaptada da norma europeia EN 789 (CEN, 2004)

O módulo de elasticidade juntamente com o módulo de ruptura, ambos calculados em ensaios estruturais, são parâmetros relevantes na caracterização tecnológica da madeira. Nos ensaios de flexão estática o módulo de elasticidade é calculado a partir de relações de força e deformação obtidas a 10% e a 40% da força máxima, conforme pode-se observar na EQUAÇÃO (23) adaptada segundo a EN 789 (CEN, 2004).

$$E = \frac{(F_2 - F_1) \cdot L1^2 \cdot L2}{16 \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \cdot I} \quad (23)$$

onde:

E : Módulo de Elasticidade (N/mm^2);

F_1 : 10% da força máxima (N);

F_2 : 40% da força máxima (N);

- L_1 : Vão de medição da deformação (mm);
- L_2 : Distância entre os apoios e a aplicação da carga (mm);
- ε_1 : Deformação correspondente à 10% da força máxima (mm);
- ε_2 : Deformação correspondente à 40% da força máxima (mm), e
- I : Momento de Inércia Baricentral (mm^4), calculado de acordo com a EQUAÇÃO (06) (item (2.1.1)).

3.2.4 Método de irradiação tridimensional

O Método de Irradiação foi estabelecido para execução neste trabalho devido a algumas vantagens:

- Método rápido de executar;
- Possível de ser realizado em laboratório, e
- Pode ser realizado com apenas um equipamento de mensuração (estação total).

Para a aplicação deste método, a metodologia constituiu em estacionar a Estação Total (TC2003) em um ponto adequado para realizar as visadas dos pontos pré-determinados nos painéis, em função do espaço disponível no laboratório (FIGURA 35).



FIGURA 35 - ASPECTO DO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO NO LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA DA MADEIRA
FONTE: O autor (2012).

Desta forma, puderam-se definir os pontos nos corpos de prova a serem monitorados, buscando atender a visibilidade que a estação total necessitaria para realizar as mensurações. Foram definidos oito pontos no corpo de prova para realizar o monitoramento geodésico ao longo de cada ensaio. Observam-se na FIGURA (36) as demarcações em vermelho nas laterais do corpo de prova, estas apresentam as posições dos pontos ao longo do corpo de prova determinados para o monitoramento.

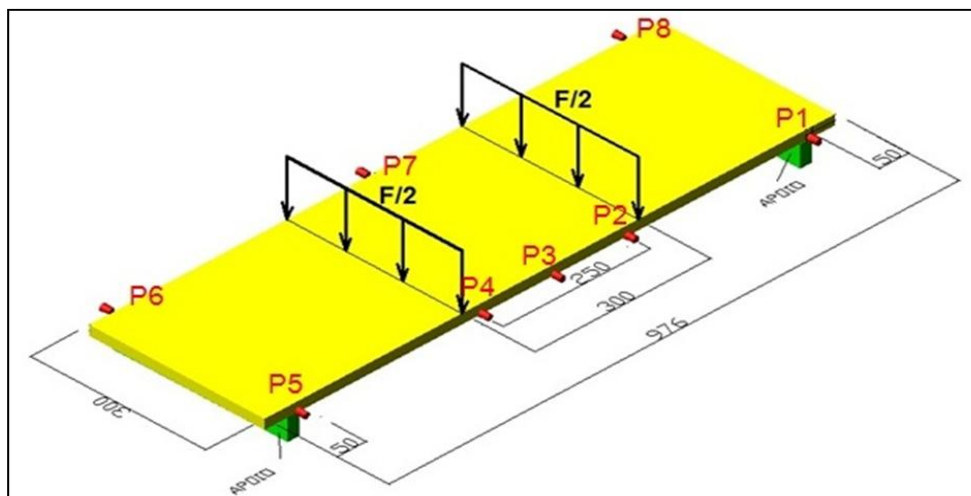


FIGURA 36 - ASPECTO DOS PONTOS NO CORPO DE PROVA PARA O MONITORAMENTO GEODÉSICO TRIDIMENSIONAL
FONTE: O autor (2012).

Os pontos P1, P5, P6, P8 (localizados sob os apoios da máquina de ensaios) e P7 do corpo de prova foram monitorados para avaliar o comportamento tridimensional dos painéis a cada ensaio. Já os pontos P2, P3 e P4, localizados no vão central de medição da deformação e/ou deslocamento ($L1$), foram determinados para o monitoramento devido à utilização dos mesmos para o cálculo da flecha de deslocamento. Desta forma, possibilitando posteriormente, comparar com os resultados obtidos com o extensômetro, visto que, ao final do ensaio estrutural tem-se o resultado do deslocamento no meio do vão central (ponto P3 – flecha máxima). Assim, todos os pontos pré-determinados foram monitorados durante o ensaio para analisar o comportamento tridimensional do corpo de prova, entretanto, somente os pontos centrais (vão de medição da deformação/deslocamento), foram utilizados para comparação entre os métodos.

Para o início do método de irradiação, o ponto cardã foi estabelecido como a origem do sistema de referência inicial, sendo o eixo Z' coincidente com o eixo principal da estação, o eixo X' contido no plano do horizonte e o eixo Y' , perpendicular ao eixo X' no sentido dextrógiro (FIGURA 37).

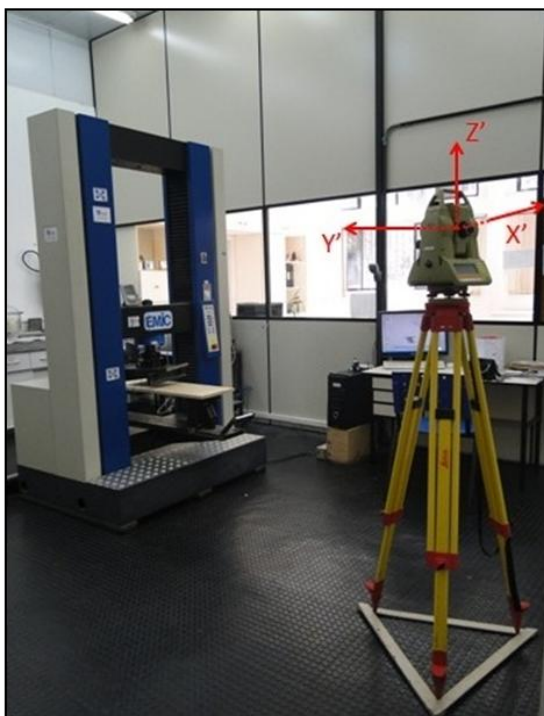


FIGURA 37 - ASPECTO DA ESTAÇÃO TOTAL ESTACIONADA NO LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA DA MADEIRA
FONTE: O autor (2012).

Definiu-se como direção de referência o ponto (P_{REF1}) escolhido dentro do laboratório, sendo que esse ponto serviu de base para a execução das irradiações, sendo a direção a este ponto visada com uma leitura da direção horizontal de $00^{\circ}00'00''$. Além disso, definiu-se outro ponto de apoio (P_{REF2}), também no interior do laboratório (FIGURA 38), com intuito de definir uma linha de referência (ponto P_{REF1} – ponto P_{REF2}). Desta forma, servindo como referência para posteriores reocupações da estação total no laboratório, possibilitando assim, que em épocas distintas possam ser realizados outros ensaios, visando estabelecer um sistema passível de repetibilidade e confiabilidade.

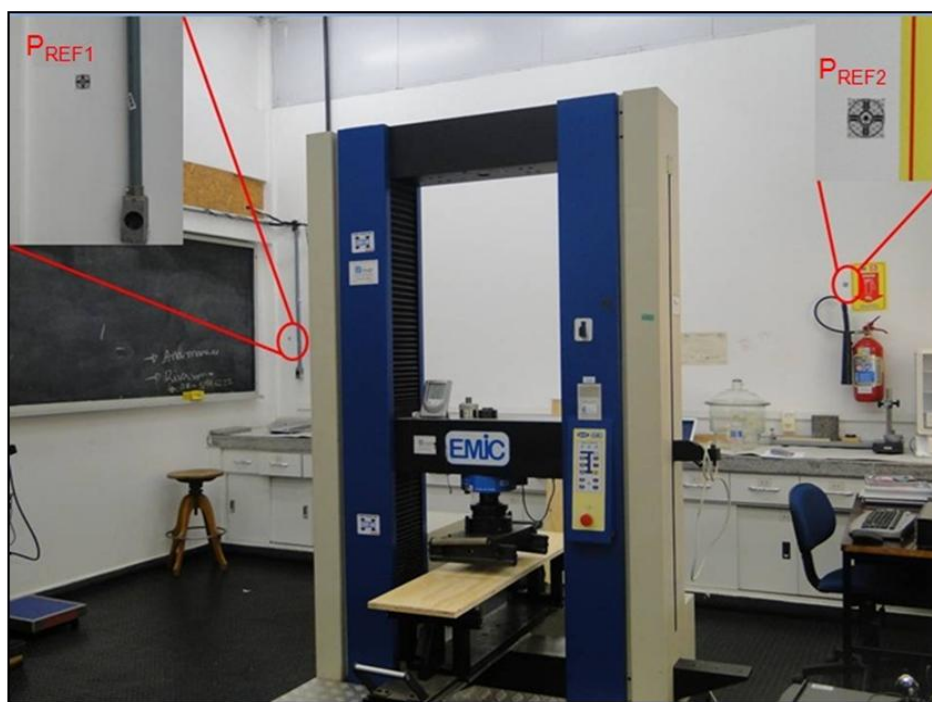


FIGURA 38 - ASPECTO DOS PONTOS DE APOIO NO LABORATÓRIO
FONTE: O autor (2012).

A partir dos dados mensurados com a estação total (ângulos horizontais, ângulos verticais e distâncias inclinadas), pôde-se realizar o cálculo tridimensional para as coordenadas dos pontos de apoio e dos pontos monitorados, conforme as EQUAÇÕES (09), (10) e (11) (item 2.2.1.1.1), considerando-se $X_0 = 0\text{ m}$; $Y_0 = 0\text{ m}$ e $Z_0 = 0\text{ m}$.

Foram obtidas as coordenadas dos oito pontos monitorados em três Fases:

- Primeira Fase: corpo de prova sem carga (estático);
- Segunda Fase: corpo de prova na primeira paralisação da máquina de ensaios (deformação de aproximadamente 1,5 mm), e
- Terceira Fase: corpo de prova na segunda paralisação da máquina de ensaios (deformação de aproximadamente 3,5 mm).

A partir das coordenadas obtidas para cada ponto monitorado, transportou-se o sistema de referência para o próprio corpo de prova. Realizou-se este procedimento para todos os corpos de prova testados. Isto porque, no monitoramento de estruturas, o sistema de coordenadas utilizado para observar os deslocamentos não deve estar no instrumento, e sim, na própria estrutura. Para a realização do transporte do sistema de referência, efetuou-se uma translação e, posteriormente, duas rotações.

Aplicou-se a translação do sistema de referência com origem no ponto cardã para o ponto P1 do corpo de prova (estático):

$$x_p = x'_p - x_o \quad (24)$$

$$y_p = y'_p - y_o \quad (25)$$

$$z_p = z'_p - z_o \quad (26)$$

onde:

x_p, y_p, z_p : Coordenadas dos pontos no sistema de referência com origem no ponto P1 do corpo de prova (estático);

x'_p, y'_p, z'_p : Coordenadas dos pontos no sistema de referência com origem no ponto cardã, e

x_o, y_o, z_o : Coordenadas do ponto P1 no sistema de referência inicial (origem no ponto cardã).

Após a translação, aplicaram-se duas rotações no sistema de referência com origem no ponto P1 do corpo de prova, a primeira rotação em torno do eixo “Z” (EQUAÇÃO 27) para coincidir o eixo “X” com a direção P1-P5 (alvo P1 para alvo P5) no corpo de prova, e a segunda rotação em torno do eixo “X” (EQUAÇÃO 28), para que o eixo “Z” fique direcionado ao nadir (medição de deslocamento nos corpos de prova) (FIGURA 39).

$$R_3(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos \gamma & \text{sen} \gamma & 0 \\ -\text{sen} \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} \quad (27)$$

onde:

$R_3(\gamma)$: Rotação em torno do eixo Z, e

x_p, y_p, z_p : Coordenadas de cada ponto no corpo de prova.

$$R_1(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \text{sen} \theta \\ 0 & -\text{sen} \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} \quad (28)$$

onde:

$R_1(\theta)$: Rotação em torno do eixo X, e

x_p, y_p, z_p : Coordenadas de cada ponto no corpo de prova.

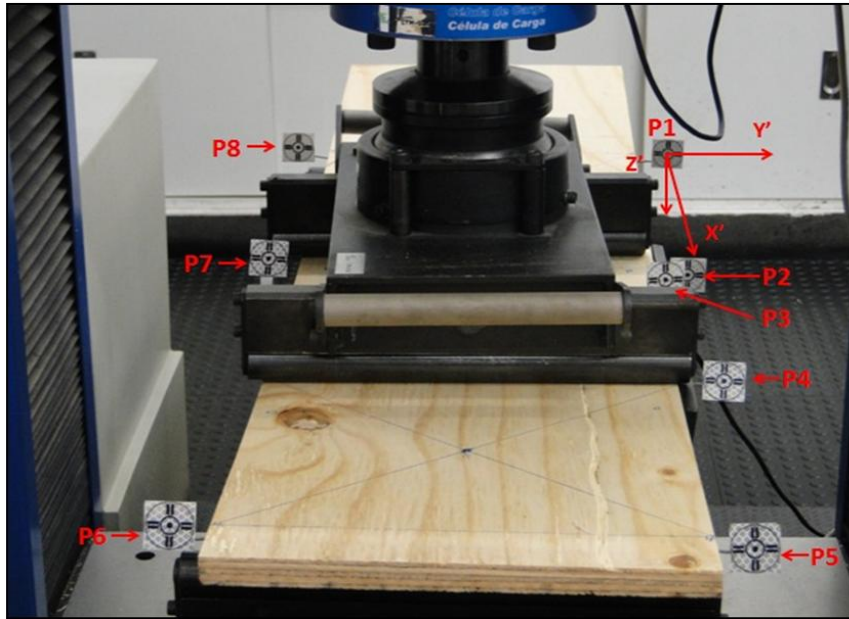


FIGURA 39 - ASPECTO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA NO CORPO DE PROVA APÓS UMA TRANSLAÇÃO E DUAS ROTAÇÕES
 FONTE: O autor (2012).

Realizou-se este procedimento para todos os corpos de prova testados. A partir das coordenadas de cada ponto para todas as fases efetuou-se o cálculo da distância espacial (EQUAÇÃO 12, item (2.2.1.1.1)) entre os pontos em cada fase, relacionando a Primeira Fase (corpo de prova estático) com a Segunda Fase (primeira paralisação da máquina de ensaios) e a Primeira Fase (corpo de prova estático) com a Terceira Fase (segunda paralisação da máquina de ensaios). Assim, pôde-se avaliar através do método de irradiação o deslocamento em cada fase para cada corpo de prova testado.

3.2.5 Ensaio de flexão estática e método de irradiação tridimensional

Esta etapa correspondeu, principalmente, na possibilidade de aplicação de um monitoramento geodésico pelo método de irradiação tridimensional juntamente com o ensaio de flexão estática para os painéis compensados. Confirmando esta

possibilidade, realizou-se a comparação dos métodos, como também, o desenvolvimento de uma nova metodologia em conjunto.

Nos corpos de prova foram definidas as subdivisões exigidas pela norma europeia. Na linha neutra de cada corpo de prova foram inseridos pequenos pregos em três pontos, como ilustrados na FIGURA (40), para posterior fixação do extensômetro, procedimento desenvolvido normalmente nos ensaios estruturais. Desta forma, possibilitando que o extensômetro forneça exatamente a deformação da linha elástica no meio do vão central do painel compensado.

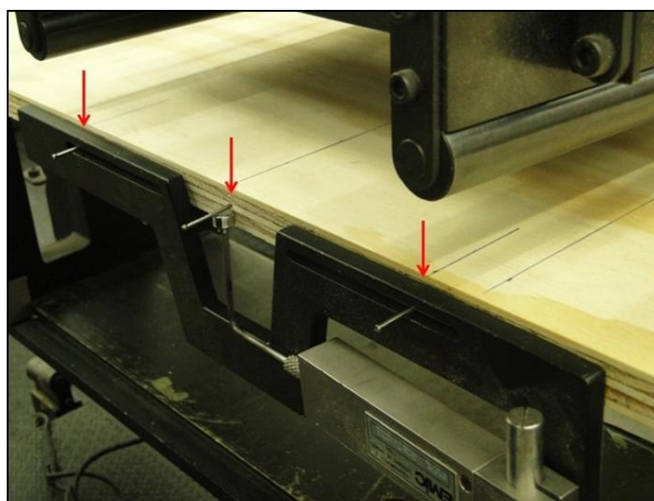


FIGURA 40 - ASPECTO DO EXTENSÔMETRO APOIADO ATRAVÉS DO DISPOSITIVO YOKE
FONTE: O autor (2012).

Utilizando-se os pregos inseridos no painel e fixando outros nos demais pontos definidos para o monitoramento, fixaram-se os adesivos refletivos nos mesmos, descartando a possibilidade de utilização dos anteparos testados no segundo experimento da Etapa I da metodologia. Entretanto, após iniciar as mensurações com o método de irradiação, alguns alvos ficavam alinhados com outros, impossibilitando a visualização e mensuração com a estação total. Desta forma, em alguns pontos utilizaram-se as abraçadeiras de aço, elevando-se o alvo e possibilitando a mensuração com a estação total. Entretanto, cada abraçadeira utilizada foi mensurada com o paquímetro, a ponto de descontar posteriormente a

altura inserida no alvo. A FIGURA (41) ilustra a posição aproximada onde foram colados cada alvo nos pregos e sua respectiva numeração.

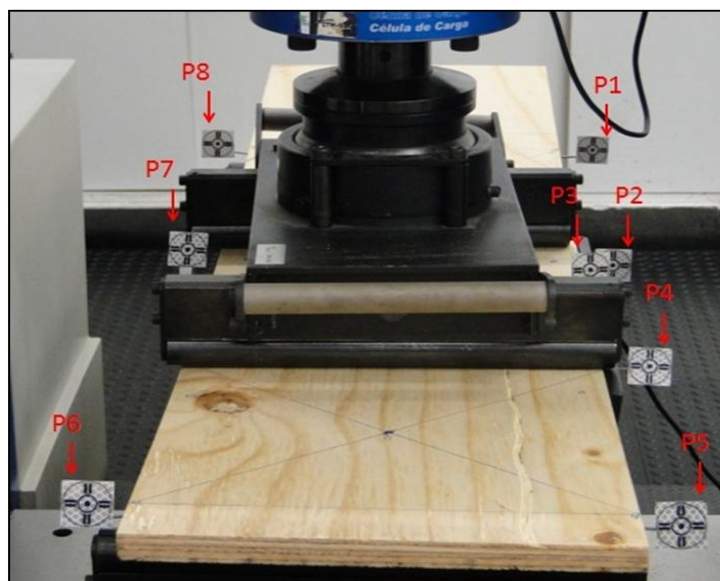


FIGURA 41 - ASPECTO DOS ADESIVOS REFLETORES FIXADOS NOS PREGOS
FONTE: O autor (2012).

A norma técnica para esse ensaio evidencia dois momentos de deformação: a 10% e a 40% da força máxima. Ou seja, no ensaio de flexão estática, em nenhum momento a máquina de ensaios paralisa a aplicação da carga. O que ocorre é uma aplicação constante de carga até a ruptura do corpo de prova (100% de deformação). Desta forma, a máquina de ensaios registra todo o ensaio, conforme carga aplicada e deformação mensurada. No final do ensaio, tem-se um registro de todas as reações de carga aplicadas e as deformações aparentes, até o momento de ruptura do corpo de prova. Assim, o módulo de elasticidade (EQUAÇÃO 23, item (3.2.3.1)) e o módulo de ruptura são calculados a partir de relações de força e deformação obtidas a 10% e a 40% da força máxima.

Entretanto, para que o método de irradiação pudesse ser realizado juntamente com o ensaio de flexão estática, definiram-se dois momentos para que a máquina de ensaios estabilizasse a carga, possibilitando, assim, realizar as irradiações dos pontos monitorados. Desta forma, os dois momentos de parada da máquina foram determinados em relação a deformação do material registrada pelo extensômetro, aproximadamente a 1,5 mm e a 3,5 mm.

O monitoramento geodésico iniciou-se com a irradiação dos pontos no corpo de prova sem aplicação de carga (Primeira Fase). Posteriormente, iniciou-se a aplicação de carga com a máquina de ensaios, parando-se em dois momentos (Segunda Fase e Terceira Fase) e medindo-se novamente os pontos de monitoramento com a estação total. Em cada fase de monitoramento foram realizadas duas séries de observações, com leituras em posição direta e inversa, de ângulos horizontais, verticais e distâncias inclinadas.

Em cada paralisação da máquina de ensaios foram registradas a carga (N) e a deformação (mm) apresentadas pela máquina de ensaios naqueles instantes, aproximadamente.

Para o cálculo do módulo de elasticidade para o trabalho proposto, realizaram-se algumas alterações na (EQUAÇÃO 23, item (3.2.3.1)). A modificação ocorreu na obtenção das componentes de carga e deformação, sendo essas obtidas a partir das paralisações da máquina de ensaios, e não mais, a 10% e 40% da força máxima. Desta forma, utilizou-se a EQUAÇÃO (29) para calcular tanto o módulo de elasticidade com os dados de deformação mensurados pelo extensômetro, quanto com os dados de deslocamentos obtidos com o método de irradiação.

$$MOE = \frac{L1^2 \cdot L2}{16 \cdot I} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta \delta} \quad (29)$$

onde:

MOE: Módulo de Elasticidade (N/mm²) adaptado para o trabalho proposto;

L1: Vão de medição da deformação e/ou deslocamento (mm);

L2: Distância entre os apoios e a aplicação da carga (mm);

I: Momento de Inércia em relação à Linha Neutra ou Baricentral (mm⁴);

ΔF : Componente da força/carga aplicada (N), obtido a partir das paradas pré-determinadas da máquina de ensaios;

$\Delta \delta$: Componente de deformação e/ou deslocamento (mm), obtido a partir das paradas pré-determinadas da máquina de ensaios.

Para o procedimento observacional, os ensaios foram conduzidos de forma a se trabalhar na parte linear do diagrama tensão-deformação. Entretanto, o corpo de prova foi levado até a ruptura, procedimento normal no ensaio estrutural, para avaliar a tensão máxima do material no colapso.

3.2.5.1 Comparação dos métodos

Ao final do ensaio estrutural a máquina de ensaios fornece a deformação da linha elástica no meio do vão central (ponto P3), ou seja, flecha máxima do corpo de prova (FIGURA 42). No método de irradiação o deslocamento não é obtido de modo direto. A estação total monitora ponto a ponto, ou seja, no caso do vão central ($L1$), há o monitoramento dos pontos P2, P3 e P4 (FIGURA 43). Em ambos os métodos, obtêm-se deformações e/ou deslocamentos da linha elástica no meio do vão central para as duas paradas pré-determinadas.

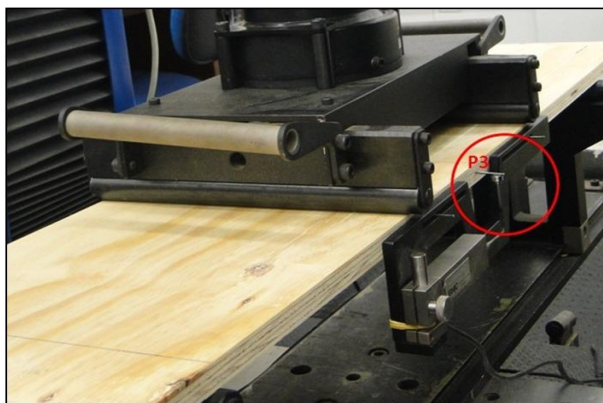


FIGURA 42 - LOCALIZAÇÃO DA LINHA ELÁSTICA NO MEIO DO VÃO CENTRAL PARA OBTENÇÃO DA DEFORMAÇÃO (FLECHA) ATRAVÉS DO ENSAIO ESTRUTURAL
FONTE: O autor (2012).

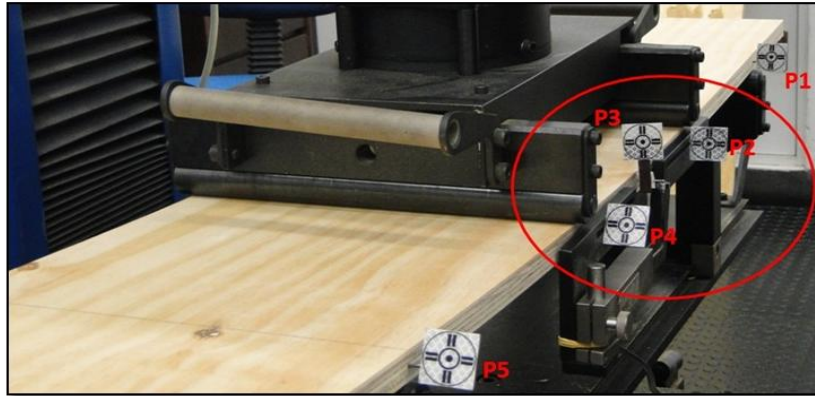


FIGURA 43 - LOCALIZAÇÃO DO VÃO CENTRAL (PONTOS P2, P3 E P4) PARA OBTENÇÃO DO DESLOCAMENTO ATRAVÉS DO MÉTODO DE IRRADIAÇÃO

FONTE: O autor (2012).

Desta forma, para realizar a comparação entre as mensurações obtidas nos dois métodos (ensaio estrutural e método de irradiação) efetuaram-se algumas análises. Executou-se o seguinte procedimento com os deslocamentos mensurados com a estação total:

1º) Cálculo do deslocamento do corpo de prova no vão central (L_1), na primeira parada da máquina de ensaios (Segunda Fase) (FIGURA 44):

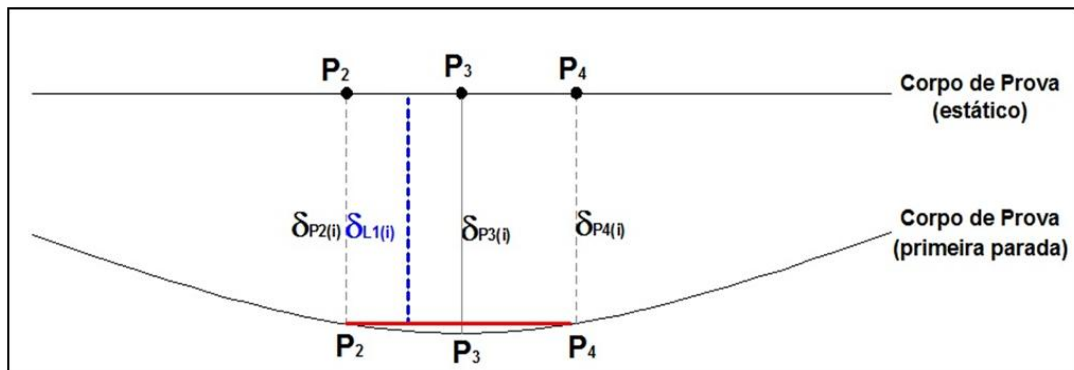


FIGURA 44 - ASPECTO DO DESLOCAMENTO INICIAL NO VÃO CENTRAL DO CORPO DE PROVA
FONTE: O autor (2012).

$$\delta_{L1(i)} = \frac{\delta_{P2(i)} + \delta_{P4(i)}}{2} \quad (30)$$

onde:

$\delta_{L1(i)}$: Deslocamento inicial (primeira parada) no vão central;

$\delta_{P2(i)}$: Deslocamento inicial (primeira parada) no ponto P2, e

$\delta_{P4(i)}$: Deslocamento inicial (primeira parada) no ponto P4.

2º) Cálculo do deslocamento da linha elástica na primeira parada da máquina de ensaios (FIGURA 45):

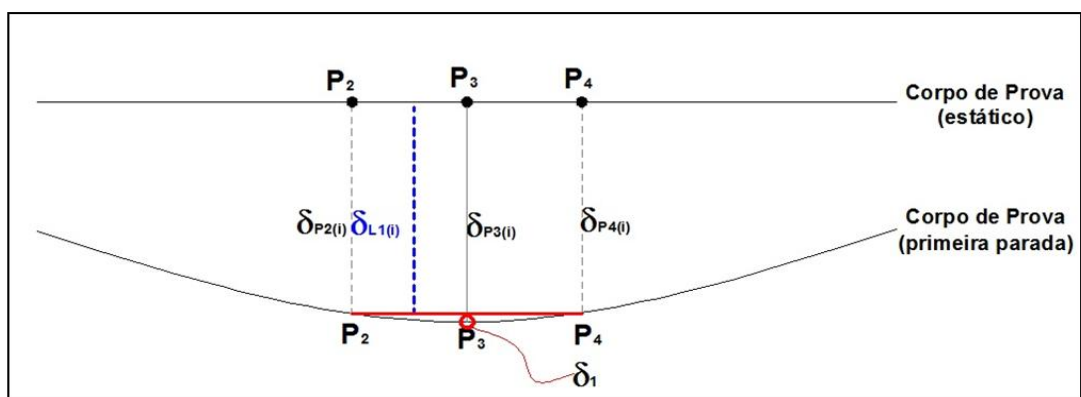


FIGURA 45 - ASPECTO DO DESLOCAMENTO DA LINHA ELÁSTICA NA PRIMEIRA PARADA DA MÁQUINA DE ENSAIOS

FONTE: O autor (2012).

$$\delta_1 = \delta_{P3(i)} - \delta_{L1(i)} \quad (31)$$

onde:

δ_1 : Deslocamento da linha elástica na primeira parada da máquina de ensaios;

$\delta_{P3(i)}$: Deslocamento inicial (primeira parada) no ponto P3, e

$\delta_{L1(i)}$: Deslocamento inicial (primeira parada) no vão central.

Para a segunda paralisação da máquina de ensaios (Terceira Fase) efetuaram-se os mesmos cálculos, utilizando-se das EQUAÇÕES (30) e (31). Desta forma, obtendo-se o deslocamento do corpo de prova no vão central ($\delta_{L1(f)}$), como

também, o deslocamento da linha elástica para a segunda parada da máquina de ensaios (δ_2) (FIGURA 46).

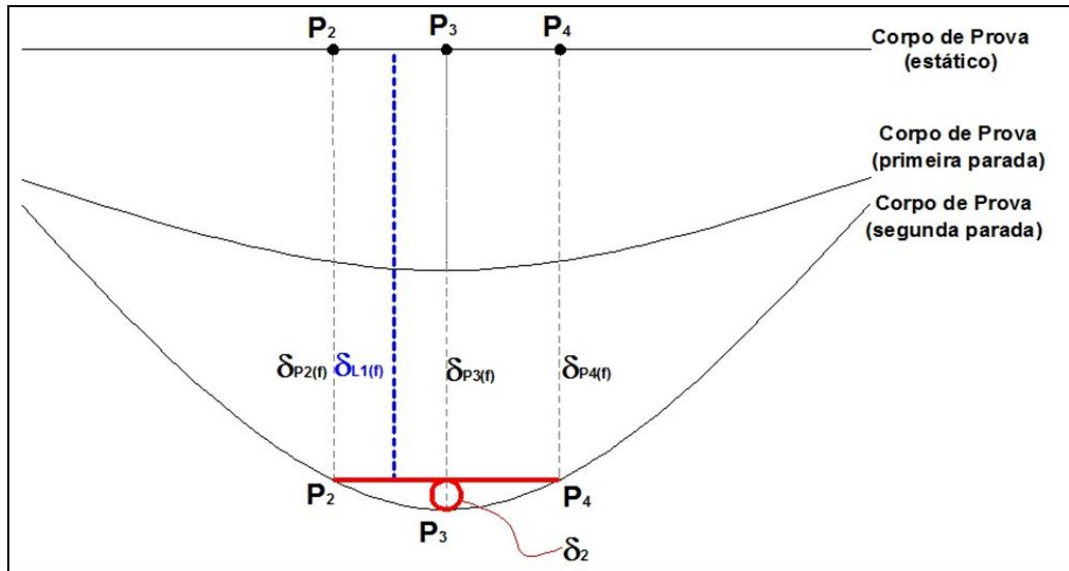


FIGURA 46 - ASPECTO DO DESLOCAMENTO DA LINHA ELÁSTICA NA SEGUNDA PARADA DA MÁQUINA DE ENSAIOS
FONTE: O autor (2012).

3º) Obtenção da Flecha Máxima (deslocamento total da linha elástica no ponto P3):

$$f_I = \delta_2 - \delta_1 \quad (32)$$

onde:

f_I : Flecha Máxima ou deslocamento no ponto P3, mensurado com a estação total (método de irradiação);

δ_1 : Deslocamento da linha elástica na primeira parada da máquina de ensaios, e

δ_2 : Deslocamento da linha elástica na segunda parada da máquina de ensaios.

Para obtenção da flecha obtida com as mensurações através do extensômetro, procedeu-se da seguinte maneira:

$$f_E = \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \quad (33)$$

onde:

f_E : Flecha Máxima ou deformação no vão central mensurado com o extensômetro;

ε_1 : Deformação da linha elástica na primeira parada da máquina de ensaios, e

ε_2 : Deformação da linha elástica na segunda parada da máquina de ensaios.

De posse dos dados de carga, deslocamento e/ou deformação nas fases de paralisação da máquina, possibilitou então, a realização dos cálculos do módulo de elasticidade (EQUAÇÃO 29, item (3.2.5)).

Com os resultados das flechas calculados para os corpos de prova em ambos os métodos, pôde-se então, compará-los e, desta forma, avaliando-se o método de irradiação como uma nova proposta para verificação de ensaios estruturais de madeira. Como também, avaliou-se o comportamento tridimensional dos corpos de prova através dos demais pontos monitorados pelo método de irradiação.

Desta forma, para verificar se os valores das flechas e do módulo de elasticidade obtidos em ambos os métodos são coerentes, aplicou-se o teste estatístico *t* de *Student* para os valores médios das flechas, como também, para os valores médios dos módulos de elasticidade. Formulou-se, então, uma hipótese nula e consequentemente, uma hipótese alternativa.

3.2.5.1.1 Análise estatística da flecha máxima

Inicialmente, formularam-se as seguintes hipóteses:

Hipótese $H_0 : \bar{x}_1 = \bar{x}_2$ (intervalo de aceitação)

Hipótese Alternativa $H_1 : \bar{x}_1 \neq \bar{x}_2$ (rejeição da hipótese nula)

onde:

\bar{x}_1 : Média das flechas mensuradas com o extensômetro, e

\bar{x}_2 : Média das flechas mensuradas com a estação total.

Fixou-se o nível de significância (α), obtendo o valor da variável t através da tabela de distribuição t de *Student*. Efetuou-se o cálculo do número de graus de liberdade da soma das duas médias populacionais (φ), conforme EQUAÇÃO (20) (item (3.1.2)).

Posteriormente, calculou-se o valor da variável t (EQUAÇÃO (21), item (3.1.2)), como também, calculou-se o valor do desvio padrão comum (σ_c) (EQUAÇÃO (22), item (3.1.2)).

3.2.5.1.2 Análise estatística do módulo de elasticidade

Para análise estatística do módulo de elasticidade também formulou-se uma hipótese nula e consequentemente, uma hipótese alternativa:

Hipótese $H_0 : \bar{x}_1 = \bar{x}_2$ (intervalo de aceitação)

Hipótese Alternativa $H_1 : \bar{x}_1 \neq \bar{x}_2$ (rejeição da hipótese nula)

onde:

\bar{x}_1 : Média do módulo de elasticidade obtido com o ensaio de flexão, e

\bar{x}_2 : Média do módulo de elasticidade obtido com o método de irradiação.

Fixou-se o nível de significância (α), obtendo o valor da variável t através da tabela de distribuição t de *Student*. Efetuou-se o cálculo do número de graus de liberdade da soma das duas médias populacionais (φ), conforme EQUAÇÃO (20) (item (3.1.2)).

Posteriormente, calculou-se o valor da variável t (EQUAÇÃO (21), item (3.1.2)), como também, calculou-se o valor do desvio padrão comum (σ_c) (EQUAÇÃO (22), item (3.1.2)). Desta forma, sendo possível analisar os resultados entre os métodos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PARTE I

4.1.1 Primeiro experimento: calibração dos alvos

Neste primeiro experimento, como as visadas foram realizadas perpendiculares aos adesivos refletores, esses responderam muito bem à refletividade. Apesar de serem visadas abaixo da linha do horizonte, os alvos propiciaram uma reflexão adequada para realização do monitoramento simulado.

As coordenadas dos três pontos centrais da viga de madeira, utilizados como teste, podem ser observadas nos QUADROS (4), (5) e (6).

PRIMEIRA LEITURA			
PONTOS	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
P2	398,46	1727,43	-546,11
P3	541,33	1679,55	-546,45
P4	682,66	1628,70	-543,76

QUADRO 4 - COORDENADAS DOS ALVOS NA PRIMEIRA LEITURA
FONTE: O autor (2012).

SEGUNDA LEITURA			
PONTOS	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
P2	398,23	1726,32	-545,71
P3	541,78	1678,81	-546,22
P4	682,26	1627,75	-543,36

QUADRO 5 - COORDENADAS DOS ALVOS NA SEGUNDA LEITURA
FONTE: O autor (2012).

TERCEIRA LEITURA			
PONTOS	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
P2	398,05	1725,49	-545,43
P3	540,98	1678,46	-546,09
P4	682,64	1628,51	-543,68

QUADRO 6 - COORDENADAS DOS ALVOS NA TERCEIRA LEITURA
FONTE: O autor (2012).

O QUADRO (7) apresenta a distância espacial entre os pontos, conforme os resultados obtidos por meio das mensurações com a estação total, e o QUADRO (8), a distância entre os pontos mensurados com o paquímetro. Analisou-se a distância espacial entre os pontos conforme dados mensurados com a estação total, comparando-se com os resultados mensurados com o paquímetro.

DISTÂNCIA ESPACIAL ENTRE OS PONTOS (mm)					
Pontos	Primeira Série	Segunda Série	Terceira Série	Média	Desvio Padrão
P2-P3	150,68	151,21	150,47	150,78	0,38
P3-P4	150,22	149,50	150,23	149,98	0,42

QUADRO 7 - DISTÂNCIA ESPACIAL ENTRE OS PONTOS MENSURADA COM A ESTAÇÃO TOTAL
FONTE: O autor (2012).

DISTÂNCIA ENTRE OS PONTOS (mm)					
Pontos	Primeira Medida	Segunda Medida	Terceira Medida	Média	Desvio Padrão
P2-P3	150,00	150,00	150,00	150,00	0,00
P3-P4	150,00	149,00	149,00	149,33	0,58

QUADRO 8 - DISTÂNCIA ENTRE OS PONTOS MENSURADA COM O PAQUÍMETRO
FONTE: O autor (2012).

De posse dessas informações concluiu-se com relação ao teste estatístico de t para a igualdade entre duas médias que:

Se $-t_{\frac{\alpha}{2}} \leq t_{CAL} \leq t_{\frac{\alpha}{2}}$, não se rejeita a hipótese H_0 .

Se $t_{CAL} > t_{\frac{\alpha}{2}}$ ou $t_{CAL} < -t_{\frac{\alpha}{2}}$, rejeita-se a hipótese H_0 .

Sendo assim, para um nível de significância 0,01 para 4 graus de liberdade, tem-se o valor tabelado = 4,604. Desta forma, os resultados do teste estatístico são apresentados no QUADRO (9).

PONTOS	φ	σ_c	t_{CAL}	t_{TAB}	HIPÓTESE
P2-P3	4	0,269	2,379	4,604	Aceita H_0
P3-P4		0,504	1,053	4,604	Aceita H_0

φ : Número de graus de liberdade da soma das duas médias populacionais (EQUAÇÃO 20, item (3.1.2));

σ_c : Desvio padrão comum (EQUAÇÃO 22, item (3.1.2));

t_{CAL} : Valor calculado de t (EQUAÇÃO 21, item (3.1.2)), e

t_{TAB} : Valor tabelado de t (Tabela de distribuição de t de Student).

QUADRO 9 - RESULTADO DO TESTE ESTATÍSTICO PARA O PRIMEIRO EXPERIMENTO
FONTE: O autor (2012).

Desta forma, comparando-se os valores de t obtidos (t_{CAL}) com o valor tabelado (t_{TAB}), observa-se que os valores estão dentro do intervalo esperado, ou seja, a hipótese H_0 deve ser aceita.

Portanto estatisticamente, os valores médios das distâncias obtidas com a estação total e com o paquímetro não diferem. A partir desta constatação, observou-se que a resposta dos adesivos refletorantes foi positiva juntamente com a resposta da estação total às leituras efetuadas.

Desta forma, este primeiro experimento proporcionou a certeza na escolha do equipamento, mostrando que a estação total TC2003, juntamente com os adesivos refletorantes utilizados, apresentaram um resultado preciso para a situação simulada.

4.1.2 Segundo experimento: verificação dos alvos refletorantes para utilização em visadas oblíquas.

O segundo experimento não apresentou resultados positivos, em função das visadas oblíquas (30° , 45° e 60°) realizadas nos alvos refletorantes colados diretamente na viga de madeira.

Em função disso, foram testados os anteparos, modificando-se assim a posição dos adesivos refletorantes em relação à viga de madeira. As visadas realizadas nos adesivos refletorantes fixados nas cantoneiras não foram satisfatórias, ou seja, não se obteve resposta nas leituras. Já com as abraçadeiras de aço, obtiveram-se as leituras normalmente. Essas diferenças nas respostas dos dois anteparos, devido às diferenças no ângulo de incidência das visadas, podem ser verificadas observando-se a FIGURA (47).



FIGURA 47 - ASPECTO DA DISPOSIÇÃO DOS ANTEPAROS NA VIGA
FONTE: O autor (2012).

Observa-se que, na utilização das abraçadeiras, é possível manuseá-las de forma a disporem os adesivos refletores em diferentes inclinações em relação à linha de visada, independente da posição da viga de madeira. Como as cantoneiras não são flexíveis, não foi possível manuseá-las, inviabilizando a movimentação dos adesivos refletores em função da posição do equipamento.

Sendo assim, realizaram-se as visadas apenas nos alvos colados nas abraçadeiras de aço. Desta forma, as três séries de observações realizadas nos cinco pontos pré-definidos estão apresentadas nos QUADROS (10), (11) e (12).

PRIMEIRA LEITURA			
PONTOS	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
P1	1854,47	2462,08	-1004,01
P2	1797,85	2176,60	-1004,88
P3	1767,12	2030,57	-1004,24
P4	1739,34	1879,97	-1006,79
P5	1690,03	1638,25	-1007,77

QUADRO 10 - COORDENADAS DOS ALVOS NA PRIMEIRA LEITURA
FONTE: O autor (2012).

SEGUNDA LEITURA			
PONTOS	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
P1	1854,43	2461,98	-1004,01
P2	1797,70	2176,47	-1004,81
P3	1766,52	2029,92	-1003,89
P4	1738,82	1879,36	-1006,51
P5	1690,62	1638,74	-1008,13

QUADRO 11 - COORDENADAS DOS ALVOS NA SEGUNDA LEITURA

FONTE: O autor (2012).

TERCEIRA LEITURA			
PONTOS	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
P1	1854,19	2461,67	-1003,91
P2	1797,74	2176,51	-1004,82
P3	1766,38	2029,78	-1003,83
P4	1738,88	1879,50	-1006,57
P5	1690,70	1638,71	-1008,11

QUADRO 12 - COORDENADAS DOS ALVOS NA TERCEIRA LEITURA

FONTE: O autor (2012).

O QUADRO (13) apresenta as diferenças entre as séries, mediante o cálculo da distância espacial entre os pontos.

VETOR DIFERENÇA ENTRE OS PONTOS (mm)					
PONTOS	1° e 2° SÉRIE	1° e 3° SÉRIE	2° e 3° SÉRIE	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
P1	0,11	0,50	0,40	0,34	0,20
P2	0,20	0,15	0,05	0,14	0,08
P3	0,95	1,15	0,20	0,77	0,50
P4	0,85	0,70	0,16	0,57	0,37
P5	0,85	0,86	0,05	0,59	0,46

QUADRO 13 - VETOR DIFERENÇA DOS PONTOS ENTRE AS SÉRIES DE OBSERVAÇÕES

FONTE: O autor (2012).

Analisando-se as distâncias dos pontos entre as séries é possível notar que praticamente todas as diferenças ocorreram abaixo do milímetro, sendo que, somente em um ponto ocorreram diferenças no milímetro. Nota-se que as coordenadas oscilaram no décimo do milímetro e algumas oscilaram apenas abaixo disso. Desta forma, mostra-se a importância da realização de mais de uma série de observações para um mesmo ponto monitorado, analisando-se sempre a precisão que se almeja.

No QUADRO (14) apresenta-se a média das coordenadas (X, Y e Z) em função das três séries para cada ponto e o desvio padrão das mesmas.

PONTOS	COORDENADAS (mm)								
	X	\bar{x}	σ	Y	\bar{y}	σ	Z	\bar{z}	σ
P1	1854,47	1854,36	0,12	2462,08	2461,91	0,16	-1004,01	-1003,98	0,05
	1854,43			2461,98			-1004,01		
	1854,19			2461,67			-1003,91		
P2	1797,85	1797,76	0,03	2176,60	2176,53	0,03	-1004,88	-1004,84	0,01
	1797,70			2176,47			-1004,81		
	1797,74			2176,51			-1004,82		
P3	1767,12	1766,67	0,15	2030,57	2030,09	0,15	-1004,24	-1003,99	0,08
	1766,52			2029,92			-1003,89		
	1766,38			2029,78			-1003,83		
P4	1739,34	1739,01	0,10	1879,97	1879,61	0,12	-1006,79	-1006,62	0,06
	1738,82			1879,36			-1006,51		
	1738,88			1879,50			-1006,57		
P5	1690,03	1690,44	0,12	1638,25	1638,57	0,09	-1007,77	-1008,00	0,07
	1690,62			1638,74			-1008,13		
	1690,70			1638,71			-1008,11		

X, Y e Z: Coordenadas tridimensionais dos pontos;

\bar{x} : Média das coordenadas, e

σ : Desvio padrão das coordenadas.

QUADRO 14 - COORDENADAS DOS PONTOS MONITORADOS E SUAS RESPECTIVAS MÉDIAS E DESVIOS PADRÃO

FONTE: O autor (2012).

Observa-se nestes resultados que o desvio padrão para a coordenada Z é inferior aos desvios padrão das coordenadas X e Y. Para um monitoramento tridimensional realizado nas circunstâncias deste experimento, observando-se também os resultados anteriormente apresentados no QUADRO (13), os deslocamentos podem apresentar um desvio padrão de até $\pm 0,5$ mm.

Em função dos resultados obtidos, verifica-se que o objetivo do segundo experimento foi alcançado, mediante a determinação de um anteparo que possa ser utilizado em conjunto com o adesivo refletor, com diferenças das coordenadas abaixo do milímetro. Sendo possível, também, a maleabilidade das abraçadeiras de aço para utilização em qualquer inclinação necessária dos adesivos refletores, para qualquer situação que fosse encontrada na Etapa II da metodologia.

4.2 ETAPA II

Nos resultados apresentados a seguir, atribui-se o termo “deformação” às mensurações efetuadas pelo extensômetro, considerando as distorções apresentadas pelo corpo de prova devido à aplicação de carga, e “deslocamento”, para as mensurações efetuadas pela estação total. Entretanto, ambas as mensurações foram efetuadas com os corpos de prova na fase elástica do diagrama tensão-deformação.

De acordo com a norma EN 789 (CEN, 2004), a deformação mensurada durante o ensaio estrutural possui uma precisão de aproximadamente $\pm 0,01$ mm. Entretanto, realizando-se uma simulação nos cálculos do módulo de elasticidade com diferentes números significativos após a vírgula no valor da deformação (mm) e/ou deslocamento (mm) observou-se que, a partir do arredondamento do terceiro número significativo houve uma redução do valor da resistência do material devido ao aumento da deformação e/ou deslocamento causado por este arredondamento. Desta forma, em função dos resultados da simulação realizada, todos os resultados de deformação e/ou deslocamento foram considerados até o quarto número significativo após a vírgula.

4.2.1 Ensaio de flexão estática

No QUADRO (15) encontram-se os resultados da força máxima (N) e das forças (N) correspondentes aos instantes da primeira parada da máquina de ensaios (Segunda Fase) e da segunda parada da máquina de ensaios (Terceira Fase), conforme dados fornecidos pela máquina de ensaios. Como também, encontram-se as deformações fornecidas pelo extensômetro em ambas as fases. Desta forma, pôde-se obter a flecha (mm) e o módulo de elasticidade (N/mm²) para posterior comparação com os resultados do método de irradiação.

CORPO DE PROVA	MOMENTOS	FORÇA (N)	FORÇA _{máx} (N)	DEFORMAÇÃO (mm)	f_E (mm)	MOE (N/mm ²)
1	1ª PARADA	1274	4421	1,5074	1,9971	6713
	2ª PARADA	3012		3,5045		
2	1ª PARADA	719	3588	1,5074	1,9998	3213
	2ª PARADA	1552		3,5072		
3	1ª PARADA	791	1789	1,5225	1,9856	3715
	2ª PARADA	1747		3,5081		
4	1ª PARADA	1429	4431	1,5207	1,9865	6030
	2ª PARADA	2981		3,5072		
5	1ª PARADA	688	2128	1,5180	1,9874	3233
	2ª PARADA	1521		3,5054		
6	1ª PARADA	678	3177	1,5340	1,9688	3304
	2ª PARADA	1521		3,5028		
7	1ª PARADA	709	3074	1,5251	1,9768	3491
	2ª PARADA	1603		3,5019		

f_E : Flecha máxima (EQUAÇÃO 33, item (3.2.5.1)), e

MOE : Módulo de elasticidade adaptado para as paradas pré-determinadas da máquina de ensaios (EQUAÇÃO 29, item (3.2.5)).

QUADRO 15 – RESULTADOS DOS CORPOS DE PROVA TESTADOS DE ACORDO COM OS MOMENTOS PRÉ-DETERMINADOS DE PARALISAÇÃO DA MÁQUINA DE ENSAIOS (MENSURADOS COM O EXTENSÔMETRO)

FONTE: O autor (2012).

4.2.2 Método de irradiação tridimensional

O método de irradiação pôde ser executado com visadas oblíquas aos alvos refletores monitorados, proporcionando uma reflexão adequada para realização das leituras. As leituras foram realizadas com duas séries de observações (PD e PI) nas três fases para cada corpo de prova, conforme a sequência apresentada na FIGURA (48): corpo de prova sem carga (Primeira Fase), corpo de prova na primeira parada (Segunda Fase) e na segunda parada da máquina de ensaios (Terceira Fase).

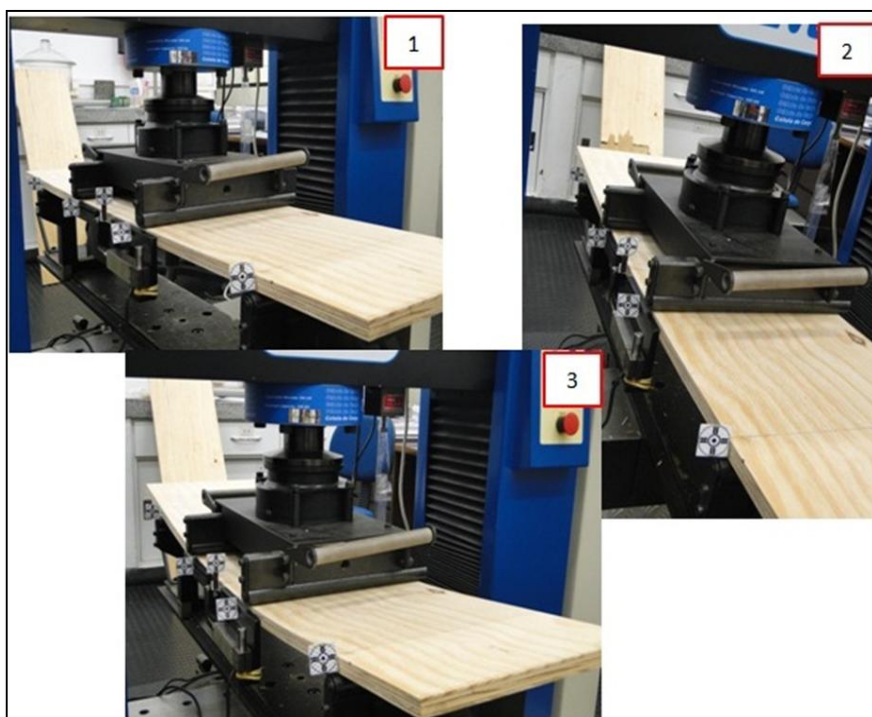


FIGURA 48 - ASPECTO DA SEQUÊNCIA DO ENSAIO REALIZADO
FONTE: O autor (2012).

As coordenadas obtidas para cada corpo de prova em cada fase estão apresentadas em ANEXO. De posse das coordenadas, calculou-se a distância espacial entre os pontos monitorados nos dois momentos de paralisação da máquina de ensaios (com carga) com o corpo de prova em seu estado normal (sem carga).

A partir dos deslocamentos mensurados com a estação total nas duas paralisações da máquina de ensaios (Segunda Fase e Terceira Fase), pôde-se obter o deslocamento no vão central para cada fase, como também, a flecha de deslocamento para cada corpo de prova. No QUADRO (16), constam os deslocamentos (δ) dos três pontos localizados no vão central (P2, P3 e P4) de cada corpo de prova para cada fase, os resultados de deslocamento no vão na primeira parada ($\delta_{Li(i)}$) e na segunda parada ($\delta_{Li(f)}$) e o deslocamento da linha elástica para cada fase (δ_1, δ_2), necessários para posterior cálculo da flecha (f_I) para cada corpo de prova.

CORPO DE PROVA	PONTOS	δ (mm) (1ºPARADA)	δ (mm) (2ºPARADA)	$\delta_{Li(i)}$ (mm)	$\delta_{Li(f)}$ (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	f_I (mm)
1	P2	17,9280	41,4633	17,8300	40,8595	1,5482	3,5167	1,9685
	P3	19,3782	44,3761					
	P4	17,7321	40,2557					
2	P2	17,7101	40,2916	17,6063	40,1784	1,5049	3,4779	1,9730
	P3	19,1112	43,6563					
	P4	17,5025	40,0653					
3	P2	17,7778	40,9340	17,5646	40,6089	1,5507	3,4880	1,9373
	P3	19,1115	44,0969					
	P4	17,3511	40,2837					
4	P2	18,4620	36,7467	18,2662	36,1937	1,5366	3,4774	1,9408
	P3	19,8028	39,6711					
	P4	18,0704	35,6406					
5	P2	17,0622	40,4885	17,2136	40,7271	1,5178	3,5132	1,9955
	P3	18,7313	44,2403					
	P4	17,3650	40,9656					
6	P2	18,6108	41,3945	17,8329	40,7315	1,5656	3,6097	2,0441
	P3	19,3985	44,3412					
	P4	17,0551	40,0685					
7	P2	17,2889	40,7674	17,2720	40,4573	1,4191	3,4290	2,0100
	P3	18,6911	43,8863					
	P4	17,2551	40,1472					

δ : Deslocamentos obtidos pelo método de irradiação (mm);

$\delta_{Li(i)}$: Deslocamento inicial (primeira parada) no vão central (mm) (EQUAÇÃO 30, item (3.2.5.1));

$\delta_{Li(f)}$: Deslocamento final (segunda parada) no vão central (mm) (EQUAÇÃO 30, item (3.2.5.1));

δ_1 : Deslocamento da linha elástica na primeira parada da máquina de ensaios (mm) (EQUAÇÃO 31, item (3.2.5.1));

δ_2 : Deslocamento da linha elástica na segunda parada da máquina de ensaios (mm) (EQUAÇÃO 31, item (3.2.5.1)), e

f_I : Flecha máxima ou deslocamento no ponto P3 (EQUAÇÃO 32, item (3.2.5.1)).

QUADRO 16 - RESULTADOS DO ENSAIO ESTRUTURAL PARA CADA CORPO DE PROVA TESTADO DE ACORDO COM O MÉTODO DE IRRADIAÇÃO

FONTE: O autor (2012).

A partir dos resultados calculados apresentados no QUADRO (16) e os fornecidos pela máquina de ensaios: Força Máxima (N), Força (N) na primeira e na segunda paralisação da máquina de ensaios para cada corpo de prova, pôde-se então, efetuar o cálculo do módulo de elasticidade para cada corpo de prova. No QUADRO (17), são apresentados os resultados da junção da máquina de ensaios e estação total, ou seja, resultados das forças (N) fornecidas pela máquina de ensaios e resultado dos deslocamentos (mm) obtidos pela estação total.

CORPO DE PROVA	MOMENTOS	FORÇA (N)	FORÇA _{máx} (N)	DESLOCAMENTO (mm)	f_I (mm)	MOE (N/mm ²)
1	1ª PARADA	1274	4421	1,5482	1,9685	6811
	2ª PARADA	3012		3,5167		
2	1ª PARADA	719	3588	1,5049	1,9730	3256
	2ª PARADA	1552		3,4779		
3	1ª PARADA	791	1789	1,5507	1,9373	3808
	2ª PARADA	1747		3,4880		
4	1ª PARADA	1429	4431	1,5366	1,9408	6172
	2ª PARADA	2981		3,4774		
5	1ª PARADA	688	2128	1,5178	1,9955	3220
	2ª PARADA	1521		3,5132		
6	1ª PARADA	678	3177	1,5656	2,0441	3182
	2ª PARADA	1521		3,6097		
7	1ª PARADA	709	3074	1,4191	2,0100	3434
	2ª PARADA	1603		3,5190		

f_I : Flecha máxima ou deslocamento no ponto P3 (EQUAÇÃO 32, item (3.2.5.1)), e

MOE :Módulo de elasticidade adaptado para as paradas pré-determinadas da máquina de ensaios (EQUAÇÃO 29, item (3.2.5)).

QUADRO 17 - RESULTADOS DO ENSAIO ESTRUTURAL PARA CADA CORPO DE PROVA TESTADO DE ACORDO COM O MÉTODO DE IRRADIAÇÃO

FONTE: O autor (2012).

4.2.3 Comparação dos resultados

A análise entre os resultados do método de irradiação e do ensaio de flexão estática pôde ser realizada comparando-se a flecha e o módulo de elasticidade obtidos a partir de ambos os métodos.

Segundo a nota técnica PRP-108²³ (APA, 2001) (*The Engineered Wood Association*), a flecha máxima admissível para o painel compensado em uso, sujeito aos esforços de flexão estática, deve apresentar resultado menor ou igual à seguinte relação:

$$f_{adm} \leq \frac{L}{360} \quad (34)$$

onde:

f_{adm} : Flecha máxima admissível, e

L : Comprimento do vão do corpo de prova testado.

Como todos os corpos de prova testados possuem dimensões iguais, o vão considerado para a realização do cálculo da EQUAÇÃO (34) foi de 876 mm. Desta forma, a flecha máxima admissível para os corpos de prova testados podem atingir um valor máximo de 2,4333 mm.

No QUADRO (18), observa-se a comparação entre os resultados das flechas, suas respectivas diferenças e a relação (porcentagem) com a flecha admissível calculada.

²³ Padrões de desempenho e políticas para a utilização do painel estrutural e produto padrão PS 2-92, padrão de desempenho para painéis de madeira de uso estrutural (APA, 2001).

CORPO DE PROVA	FLECHA (f) (mm)			
	ENSAIO DE FLEXÃO	MÉTODO DE IRRADIAÇÃO	DIFERENÇA	FLECHA ADMISSÍVEL (%)
1	1,9971	1,9685	0,0286	1,18
2	1,9998	1,9730	0,0268	1,10
3	1,9856	1,9373	0,0483	1,98
4	1,9865	1,9408	0,0457	1,88
5	1,9874	1,9955	0,0081	0,33
6	1,9688	2,0441	0,0753	3,09
7	1,9768	2,0100	0,0332	1,36
\bar{x}	1,9860	1,9813	0,0380	1,56
σ	0,0108	0,0382	0,0212	0,8698

f : Flecha no ensaio de flexão: obtida a partir da mensuração do extensômetro no ponto P3 do corpo de prova nas duas paradas pré-determinadas da máquina de ensaios;

f : Flecha no método de irradiação: obtida a partir da mensuração com a estação total dos três pontos (P2, P3 e P4) no vão central nas três fases do monitoramento geodésico (Primeira Fase: corpo de prova estático; Segunda Fase: corpo de prova na primeira parada da máquina de ensaios e Terceira Fase: corpo de prova na segunda parada da máquina de ensaios;

\bar{x} : Média, e

σ : Desvio padrão.

QUADRO 18 - RESULTADOS DAS FLECHAS PARA CADA MÉTODO
FONTE: O autor (2012).

Avaliando-se os resultados apresentados no QUADRO (18), nota-se que, as diferenças entre as flechas apresentaram uma média de 0,0380 mm. Ou seja, esse valor médio pode diferir numa média de 1,56% no resultado da flecha admissível para o tipo de corpo de prova testado.

Desta forma, aplicou-se o teste estatístico t de *Student* para verificar se os valores das flechas obtidas com o método de irradiação são coerentes com as obtidas com o ensaio de flexão estática, a partir das seguintes relações:

Se $-t_{\frac{\alpha}{2}} \leq t_{CAL} \leq t_{\frac{\alpha}{2}}$, não se rejeita a hipótese H_0 .

Se $t_{CAL} > t_{\frac{\alpha}{2}}$ ou $t_{CAL} < -t_{\frac{\alpha}{2}}$, rejeita-se a hipótese H_0 .

Sendo assim, para um nível de significância 0,01 para 12 graus de liberdade, tem-se o valor tabelado = 3,0545. Desta forma, os resultados do teste estatístico são apresentados no QUADRO (19).

FLECHA	\bar{x}	σ	φ	σ_c	t_{CAL}	t_{TAB}	HIPÓTESE
ENSAIO DE FLEXÃO	1,9860	0,0108	12	0,0281	0,0891	3,0545	Aceita H_0
MÉTODO DE IRRADIAÇÃO	1,9813	0,0382					

\bar{x} : Média das flechas;

σ : Desvio padrão;

φ : Número de graus de liberdade da soma das duas médias populacionais (EQUAÇÃO 20 , item (3.1.2));

σ_c : Desvio padrão comum (EQUAÇÃO 22, item (3.1.2));

t_{CAL} : Valor calculado de t (EQUAÇÃO 21, item (3.1.2)), e

t_{TAB} : Valor tabelado de t (Tabela de distribuição de t de Student).

QUADRO 19 - RESULTADO DO TESTE ESTATÍSTICO PARA A COMPARAÇÃO DAS FLECHAS ENTRE OS MÉTODOS

FONTE: O autor (2012).

Desta forma, comparando-se o valor de t obtido (t_{CAL}) com o valor tabelado (t_{TAB}), observa-se que o valor calculado está dentro do intervalo esperado, ou seja, a hipótese H_0 deve ser aceita. Portanto estatisticamente, os valores médios das flechas obtidas com o ensaio de flexão estática e com o método de irradiação tridimensional não diferem. Observou-se também, que o desvio padrão das flechas obtidas com o ensaio de flexão foi inferior ao desvio padrão das flechas obtidas com o método de irradiação.

Para a avaliação entre os módulos de elasticidade, utilizou-se da EQUAÇÃO (29), item (3.2.5), para fazer a seguinte relação:

$$F = \frac{MOE \cdot 16 \cdot I \cdot d_f}{L1^2 \cdot L2} \quad (35)$$

onde:

MOE:Módulo de Elasticidade (N/mm^2) adaptado para as paradas pré-determinadas da máquina de ensaios;

L1:Vão de medição da deformação e/ou deslocamento (mm);

L2:Distância entre os apoios e a aplicação da carga (mm);

I:Momento de Inércia em relação à Linha Neutra ou Baricentral (mm^4) (EQUAÇÃO 06, item (2.1.1));

F:Força/carga aplicada (N), e

d_f:Diferença entre as flechas (mm).

Desta forma, utilizando-se a EQUAÇÃO (35) obteve-se através da diferença entre as flechas (mm), o quanto de força/carga (N) pode chegar a divergir entre os métodos. No QUADRO (20) encontra-se o módulo de elasticidade para cada corpo de prova conforme o equipamento de mensuração utilizado e a diferença na carga máxima admissível se utilizado o método de irradiação para mensuração.

CORPO DE PROVA	PARADAS PRÉ-DETERMINADAS (MENSURAÇÃO COM O EXTENSÔMETRO)	PARADAS PRÉ-DETERMINADAS (MENSURAÇÃO COM A ESTAÇÃO TOTAL)		
		MOE^{**} (N/mm ²)	DIFERENÇA	
	MOE^* (N/mm ²)		CARGA (N)	CARGA MÁXIMA (%)
1	6713	6811	2,57	0,57
2	3213	3256	1,15	0,32
3	3715	3808	2,43	1,33
4	6030	6172	3,72	0,82
5	3233	3220	0,34	0,16
6	3304	3182	3,17	0,98
7	3491	3434	1,51	0,48
\bar{x}	4243	4248	2,13	0,67
σ	1478	1558	1,19	0,41

MOE^* : Módulo de elasticidade adaptado para as paradas pré-determinadas da máquina de ensaios calculado com as mensurações obtidas pelo extensômetro (EQUAÇÃO 29, item (3.2.5));

MOE^{**} : Módulo de elasticidade adaptado para as paradas pré-determinadas da máquina de ensaios calculado com as mensurações obtidas com a estação total (EQUAÇÃO 29, item (3.2.5));

CARGA: Diferença da carga/força (N) entre os métodos obtida pela EQUAÇÃO (35) (item 4.2.3);

CARGA MÁXIMA: Diferença em porcentagem na carga máxima admissível se utilizado o método de irradiação;

\bar{x} : Média, e

σ : Desvio padrão.

QUADRO 20 - RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA AMBOS OS MÉTODOS
FONTE: O autor (2012).

Observa-se que os resultados do módulo de elasticidade entre os métodos são semelhantes. Esta semelhança é comprovada analisando-se o quanto a diferença entre os resultados interfere na carga máxima admissível para o material. Desta forma, apresentando uma média 0,67% de diferença na carga máxima admissível. Essa diferença, por ser irrelevante em relação à carga máxima admissível, não acarreta alterações na análise de resistência para os painéis multilaminados analisados.

Entretanto, aplicou-se o teste estatístico *t* de *Student* para verificar se os valores dos módulos de elasticidade obtidos com o método de irradiação são coerentes com os obtidos com o ensaio de flexão estática, a partir das seguintes relações:

Se $-t_{\frac{\alpha}{2}} \leq t_{CAL} \leq t_{\frac{\alpha}{2}}$, não se rejeita a hipótese H_0 .

Se $t_{CAL} > t_{\frac{\alpha}{2}}$ ou $t_{CAL} < -t_{\frac{\alpha}{2}}$, rejeita-se a hipótese H_0 .

Sendo assim, para um nível de significância 0,01 para 12 graus de liberdade, tem-se o valor tabelado = 3,0545. Desta forma, os resultados do teste estatístico são apresentados no QUADRO (21).

MÓDULO DE ELASTICIDADE	\bar{x}	σ	φ	σ_c	t_{CAL}	t_{TAB}	HIPÓTESE
ENSAIO DE FLEXÃO	4243	1478	12	1518	0,0018	3,0545	Aceita H_0
MÉTODO DE IRRADIAÇÃO	4248	1558					

\bar{x} : Média dos módulos de elasticidade;

σ : Desvio padrão;

φ : Número de graus de liberdade da soma das duas médias populacionais (EQUAÇÃO 20, item (3.1.2));

σ_c : Desvio padrão comum (EQUAÇÃO 22, item (3.1.2));

t_{CAL} : Valor calculado de t (EQUAÇÃO 21, item (3.1.2)), e

t_{TAB} : Valor tabelado de t (Tabela de distribuição de t de Student).

QUADRO 21 - RESULTADOS DO TESTE ESTATÍSTICO PARA A COMPARAÇÃO DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE ENTRE OS MÉTODOS
FONTE: O autor (2012).

Comparando-se o valor de t obtido (t_{CAL}) com o valor tabelado (t_{TAB}), observa-se que o valor calculado está dentro do intervalo esperado, ou seja, a hipótese H_0 deve ser aceita. Portanto estatisticamente, os valores médios dos módulos de elasticidade obtidos com o ensaio de flexão estática e com o método de irradiação tridimensional não diferem.

Verifica-se com os resultados do teste estatístico apresentados no QUADRO (19) e (21), que o método de irradiação tridimensional apresenta uma metodologia que pode ser desenvolvida para obter a flecha de deslocamento e o módulo de elasticidade para os painéis multilaminados, visto que, os resultados são condizentes com o ensaio de flexão estática.

4.2.4 Comportamento tridimensional dos corpos de prova

Para analisar o comportamento tridimensional dos corpos de prova e os deslocamentos obtidos com o método de irradiação em cada ensaio, são apresentados a seguir cada corpo de prova testado nas três fases: em estado inicial (estático), na primeira e na segunda paralisação da máquina de ensaios.

Entretanto, consideraram-se todos os deslocamentos verticais para baixo negativos, para melhor visualização e interpretação dos resultados do comportamento dos corpos de prova nas FIGURAS apresentadas a seguir.

4.2.4.1 Corpo de prova 1

A FIGURA (49) apresenta a modelagem tridimensional do corpo de prova não submetido à aplicação de carga (primeira fase). Nota-se que o painel não se apresenta perfeitamente horizontal no início do ensaio. Observa-se que os pontos P5 e P6 (lado esquerdo do painel) possuem uma diferença de aproximadamente 25,39 mm. Já os pontos simétricos, pontos P1 e P8 (lado direito do painel), apresentam uma diferença de apenas 1,64 mm. Importante salientar o vão central do corpo de prova: pontos P2, P3 e P4 (pontos utilizados para o cálculo de deslocamento), encontram-se desnivelados. Do ponto P2 para o P3 tem-se um desnível de aproximadamente de 5,27 mm, e do ponto P3 para o P4, aproximadamente 4,39 mm.

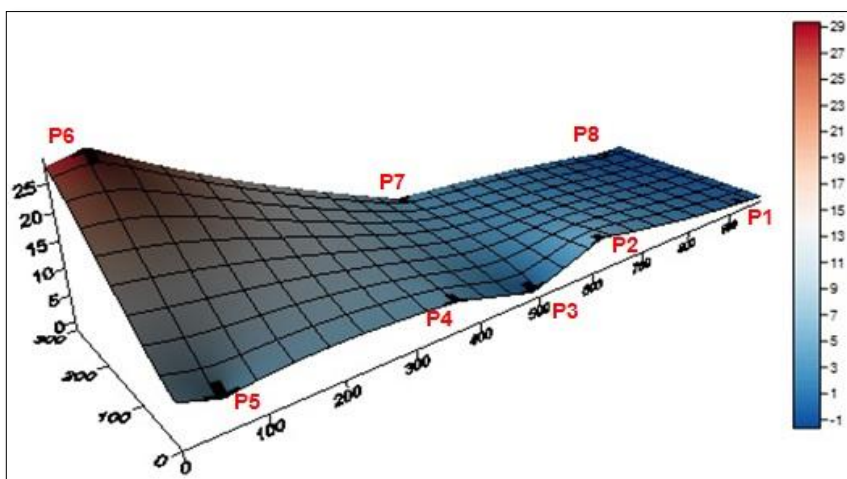


FIGURA 49 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 1: ESTADO ESTÁTICO (PRIMEIRA FASE)
 FONTE: O autor (2012).

Observa-se na segunda fase (FIGURA 50), que o corpo de prova apresentou maior deslocamento próximo à carga aplicada (pontos P2, P3, P4 e P7) e menores deslocamentos em direção aos apoios (pontos P1, P5, P6 e P8). Além disso, o ponto P8 teve deslocamento vertical para cima de aproximadamente 3,19 mm. Os maiores deslocamentos observados foram de -20,71 mm para o ponto P7 e -19,38 mm para o ponto P3 (pontos simétricos no painel).

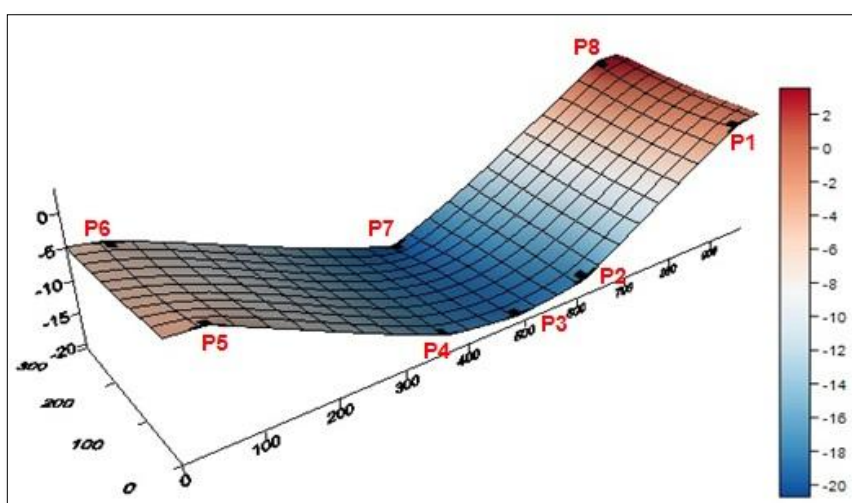


FIGURA 50 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 1: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE)
 FONTE: O autor (2012).

A FIGURA (51) mostra os isodeslocamentos do painel multilaminado quando submetido ao primeiro carregamento. Os dados utilizados nesta modelagem encontram-se no QUADRO (22).

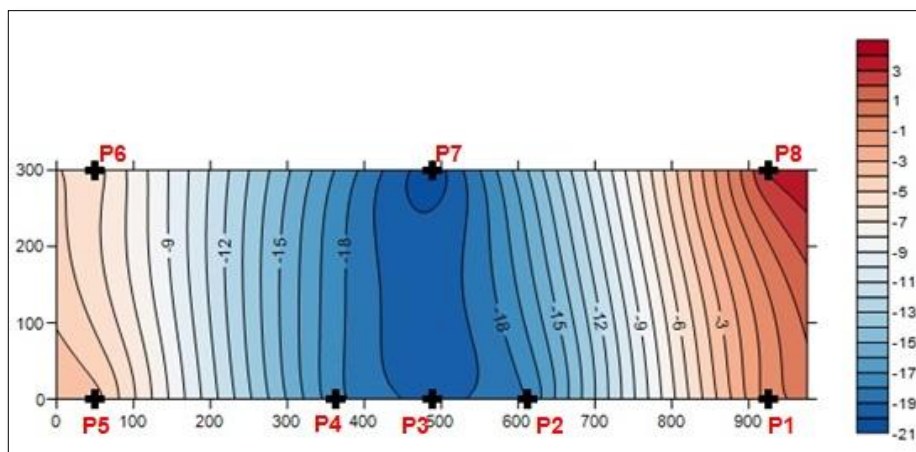


FIGURA 51 - ISODESLOCAMENTOS DO CORPO DE PROVA 1: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE)
FONTE: O autor (2012).

PONTOS	DESLOCAMENTO (mm)
P1	-0,4702
P2	-17,9280
P3	-19,3782
P4	-17,7321
P5	-3,5778
P6	-5,5755
P7	-20,7096
P8	3,1889

QUADRO 22 - DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA SEGUNDA FASE
FONTE: O autor (2012).

Os deslocamentos observados na terceira fase (FIGURA 52) foram obtidos comparando-se com o corpo de prova na primeira fase (estático). Os pontos situados mais ao centro do corpo de prova continuaram deslocando em maior proporção do que os pontos situados nas extremidades do painel. O ponto P5 e o ponto P8 continuaram tendo deslocamentos verticais para cima, neste caso, de

aproximadamente 10,53 mm e 13,02 mm, respectivamente. O ponto P1 apresentou menor deslocamento, aproximadamente -2,06 mm.

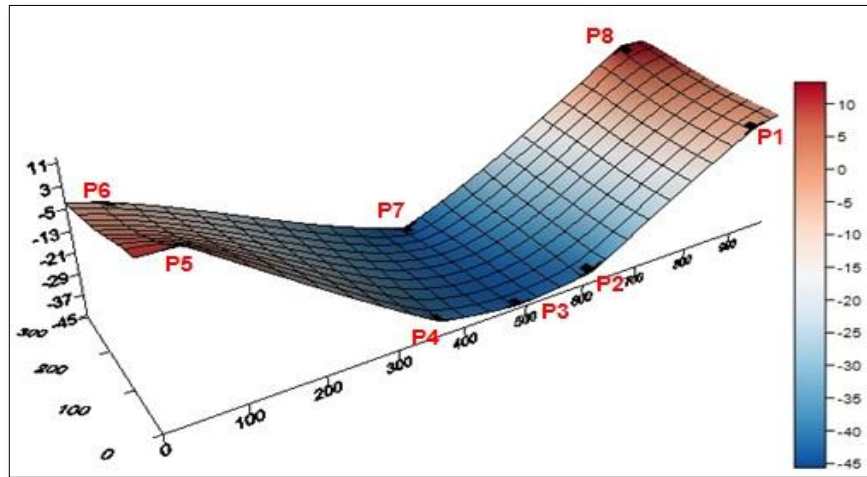


FIGURA 52 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 1: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE)
FONTE: O autor (2012).

Observa-se na FIGURA (53), o mesmo modelo apresentado anteriormente na forma de isodeslocamentos, onde evidenciam-se os deslocamentos superficiais do corpo de prova.

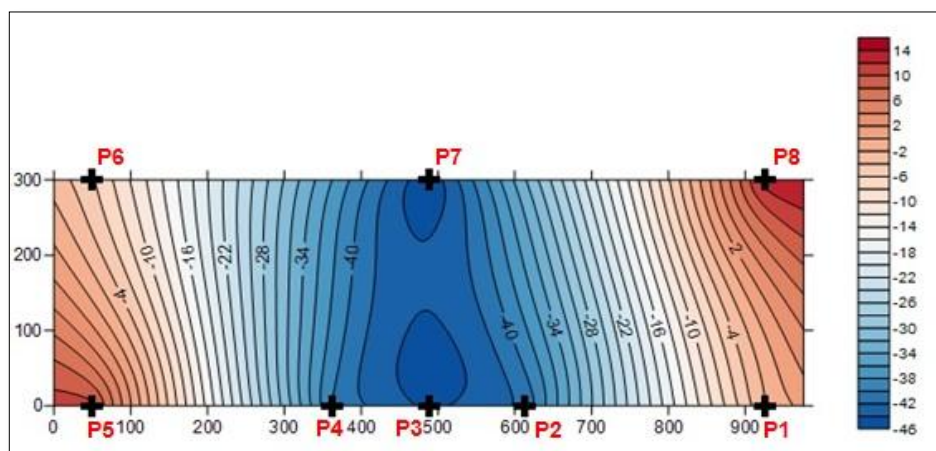


FIGURA 53 - ISODESLOCAMENTOS DO CORPO DE PROVA 1: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE)
FONTE: O autor (2012).

PONTOS	DESLOCAMENTO (mm)
P1	-2,0592
P2	-41,4633
P3	-44,3761
P4	-40,2557
P5	10,5290
P6	-5,7596
P7	-45,6867
P8	13,0219

QUADRO 23 - DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA TERCEIRA FASE
FONTE: O autor (2012).

4.2.4.2 Corpo de prova 2

A FIGURA (54) apresenta a modelagem tridimensional do corpo de prova não submetido à aplicação de carga (primeira fase). Nota-se que o painel encontra-se desnivelado em relação às suas extremidades laterais. O desnível mais acentuado ocorreu entre os pontos P1 e P8 (lado direito do painel) de aproximadamente 8,15 mm. No vão central, do ponto P2 para o P3 tem-se um desnível de aproximadamente de 1,37 mm, e do ponto P3 para o P4, aproximadamente 3,71 mm.

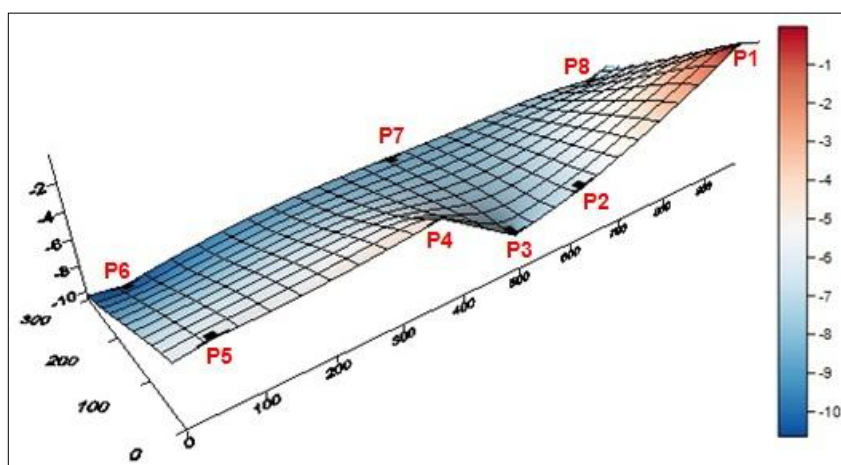


FIGURA 54 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 2: ESTADO ESTÁTICO (PRIMEIRA FASE)
FONTE: O autor (2012).

Na segunda fase (FIGURA 55), observa-se que o corpo de prova apresentou maior deslocamento próximo à carga aplicada (pontos P2, P3, P4 e P7) e menores deslocamentos em direção aos apoios (pontos P1, P5, P6 e P8). Entretanto, os pontos P5 e P8 apresentaram deslocamentos verticais para cima de aproximadamente 0,85 mm e 3,50 mm, respectivamente. Os maiores deslocamentos observados foram de -19,11 mm para o ponto P3 e -18,71 mm para o ponto P7 (pontos simétricos no painel).

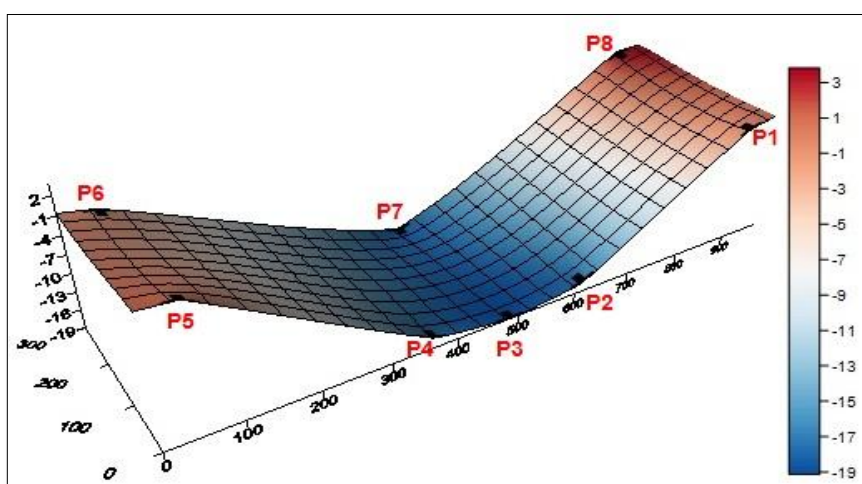


FIGURA 55 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 2: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE)

FONTE: O autor (2012).

A FIGURA (56) mostra os isodeslocamentos do painel multilaminado quando submetido ao primeiro carregamento. Os dados utilizados nesta modelagem encontram-se no QUADRO (24).

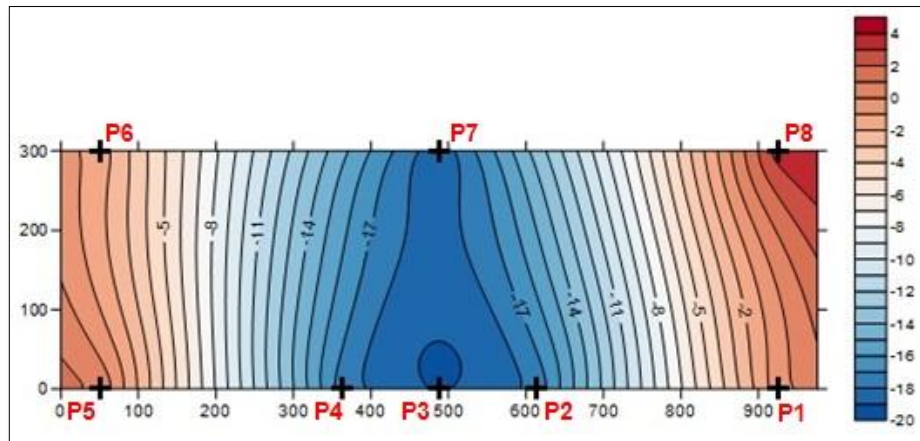


FIGURA 56 - ISODESLOCAMENTOS DO CORPO DE PROVA 2: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE)
 FONTE: O autor (2012).

PONTOS	DESLOCAMENTO (mm)
P1	-0,3767
P2	-17,7101
P3	-19,1112
P4	-17,5025
P5	0,8539
P6	-1,4423
P7	-18,7077
P8	3,4966

QUADRO 24 - DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA SEGUNDA FASE
 FONTE: O autor (2012).

Os deslocamentos observados na terceira fase (FIGURA 57) foram obtidos comparando-se com o corpo de prova na primeira fase (estático). Os pontos situados mais ao centro do corpo de prova continuaram deslocando em maior proporção do que os pontos situados nas extremidades do painel. Novamente os pontos P5 e P8 apresentaram deslocamentos verticais para cima de aproximadamente 1,20 mm e 8,53 mm.

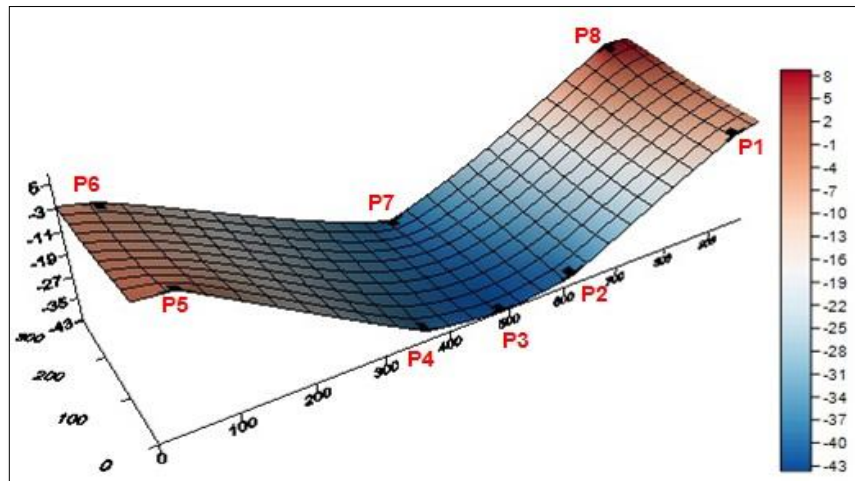


FIGURA 57 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 2: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE)

FONTE: O autor (2012).

A FIGURA (58) mostra os isodeslocamentos do painel multilaminado quando submetido ao segundo carregamento. Os dados utilizados nesta modelagem encontram-se no QUADRO (25).

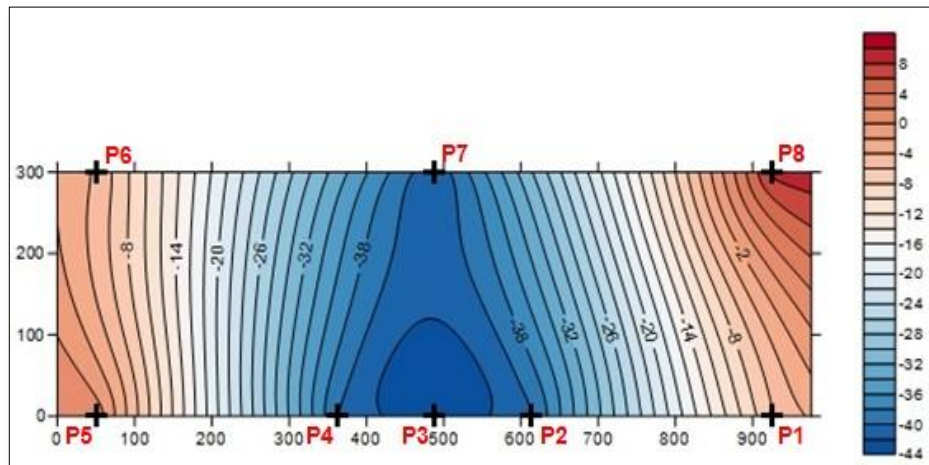


FIGURA 58 - ISODESLOCAMENTOS DO CORPO DE PROVA 2: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE)

FONTE: O autor (2012).

PONTOS	DESLOCAMENTO (mm)
P1	-6,0766
P2	-40,2916
P3	-43,6563
P4	-40,0653
P5	1,2037
P6	-4,2737
P7	-41,6097
P8	8,5322

QUADRO 25 - DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA TERCEIRA FASE
FONTE: O autor (2012).

4.2.4.3 Corpo de prova 3

A FIGURA (59) apresenta a modelagem tridimensional do corpo de prova não submetido à aplicação de carga (primeira fase). Nota-se que o painel não se apresenta perfeitamente horizontal no início do ensaio. Observa-se que os pontos P5 e P6 (lado esquerdo do painel) possuem uma diferença de aproximadamente 2,51 mm. Já os pontos simétricos, pontos P1 e P8 (lado direito do painel), apresentam uma diferença de apenas 5,83 mm. No vão central observa-se um desnível de aproximadamente 9,33 mm do ponto P2 para o ponto P3, e 3,24 mm do P3 para o ponto P4.

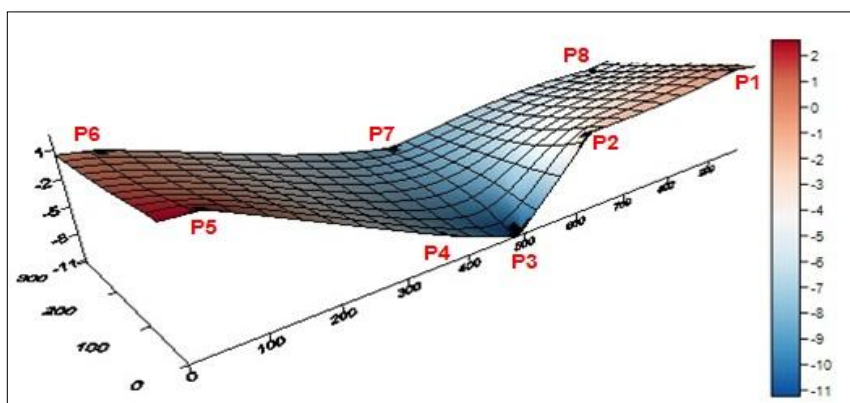


FIGURA 59 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 3: ESTADO ESTÁTICO (PRIMEIRA FASE)
FONTE: O autor (2012).

Na segunda fase (FIGURA 60), pôde-se observar que o corpo de prova apresentou maior deslocamento próximo à carga aplicada (pontos P2, P3, P4 e P7) e menores deslocamentos em direção aos apoios (pontos P1, P5, P6 e P8). Entretanto, os pontos P6 e P8 tiveram deslocamentos verticais para cima de aproximadamente 2,08 mm e 3,79 mm, respectivamente. Os maiores deslocamentos observados foram de -19,73 mm para o ponto P7 e -19,12 mm para o ponto P3 (pontos simétricos no painel).

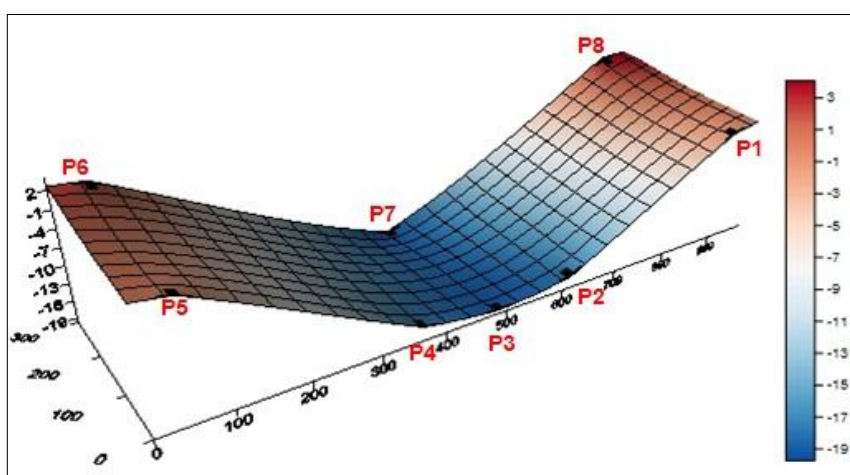


FIGURA 60 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 3: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE)

FONTE: O autor (2012).

A FIGURA (61) mostra os isodeslocamentos do painel multilaminado quando submetido ao primeiro carregamento. Os dados utilizados nesta modelagem encontram-se no QUADRO (26).

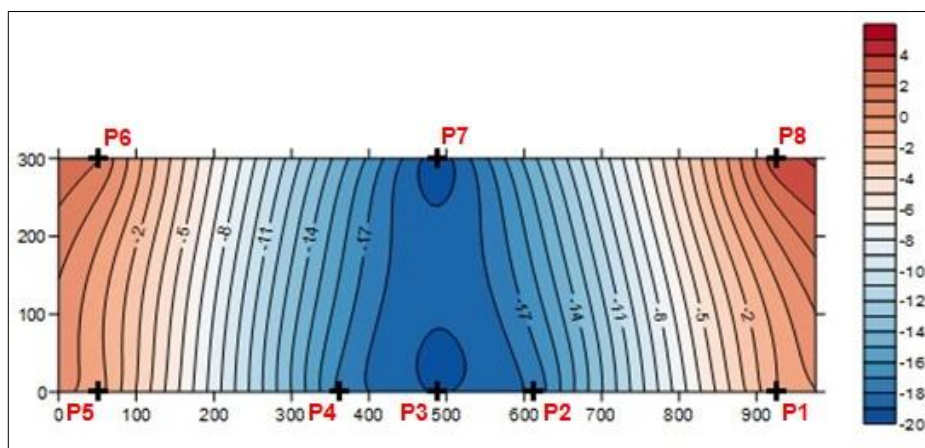


FIGURA 61 - ISODESLOCAMENTOS DO CORPO DE PROVA 3: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE)
 FONTE: O autor (2012).

PONTOS	DESLOCAMENTO (mm)
P1	-1,0085
P2	-17,7781
P3	-19,1153
P4	-17,3511
P5	-0,4620
P6	2,0850
P7	-19,7305
P8	3,7949

QUADRO 26 - DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA SEGUNDA FASE
 FONTE: O autor (2012).

Os deslocamentos observados na terceira fase (FIGURA 62) foram obtidos comparando-se com o corpo de prova na primeira fase (estático). Os pontos situados mais ao centro do corpo de prova continuaram deslocando em maior proporção do que os pontos situados nas extremidades do painel. O ponto P6 continuou tendo deslocamentos verticais para cima, apresentando nesta fase aproximadamente 5,01 mm de deslocamento. O ponto P5 apresentou menor deslocamento, aproximadamente -0,74 mm.

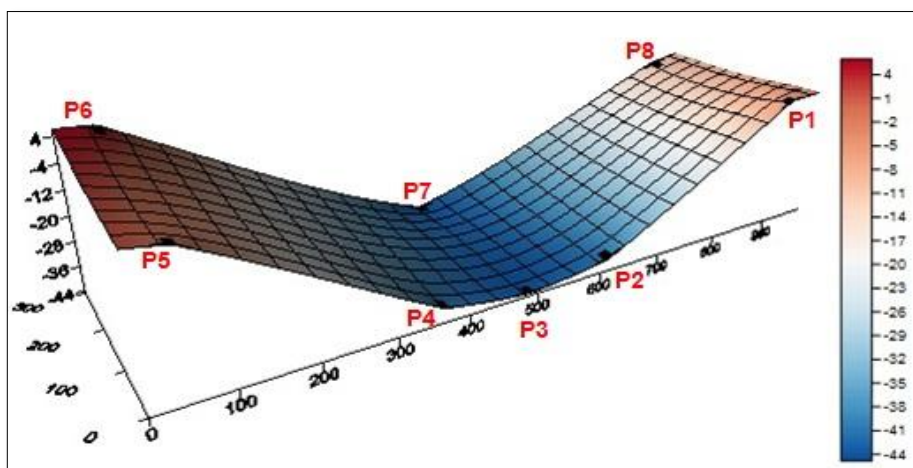


FIGURA 62 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 3: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE)
 FONTE: O autor (2012).

A FIGURA (63) mostra os isodeslocamentos do painel multilaminado quando submetido ao segundo carregamento. Os dados utilizados nesta modelagem encontram-se no QUADRO (27).

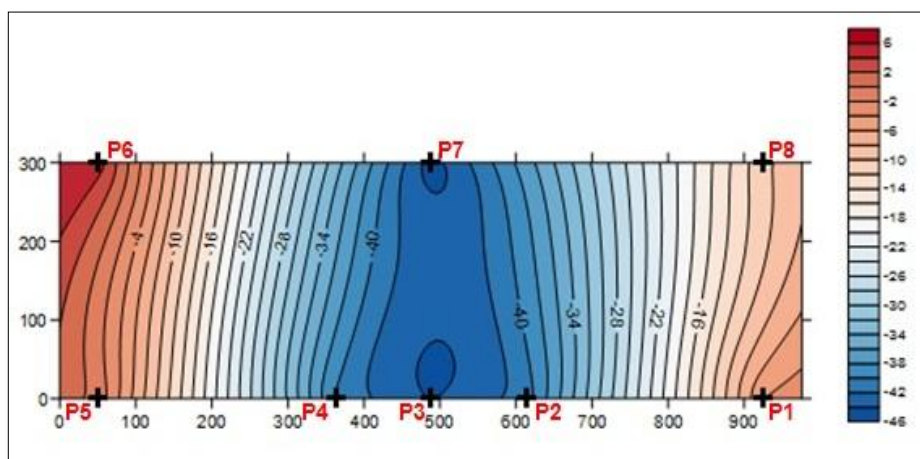


FIGURA 63 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 3: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE)
 FONTE: O autor (2012).

PONTOS	DESLOCAMENTO (mm)
P1	-3,9896
P2	-40,9340
P3	-44,0969
P4	-40,2837
P5	-0,7439
P6	5,0101
P7	-44,8510
P8	-10,4598

QUADRO 27 - DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA TERCEIRA FASE
 FONTE: O autor (2012).

4.2.4.4 Corpo de prova 4

A modelagem tridimensional do corpo de prova em estado estático (sem aplicação de carga) pode ser visualizada na FIGURA (64). Nota-se que os pontos do lado direito do corpo de prova encontram-se nivelados se comparado com o lado esquerdo do mesmo. Observa-se que os pontos P5 e P6 (lado esquerdo do painel) possuem uma diferença de aproximadamente 8,75 mm. Já os pontos simétricos, pontos P1 e P8 (lado direito do painel), apresentam uma diferença de apenas 1,02 mm. Importante salientar o vão central do corpo de prova: pontos P2, P3 e P4 (pontos utilizados para o cálculo de deslocamento), encontram-se desnivelados. Do ponto P2 para o P3 tem-se um desnível de aproximadamente de 3,78 mm, e do ponto P3 para o P4, aproximadamente 5,50 mm.

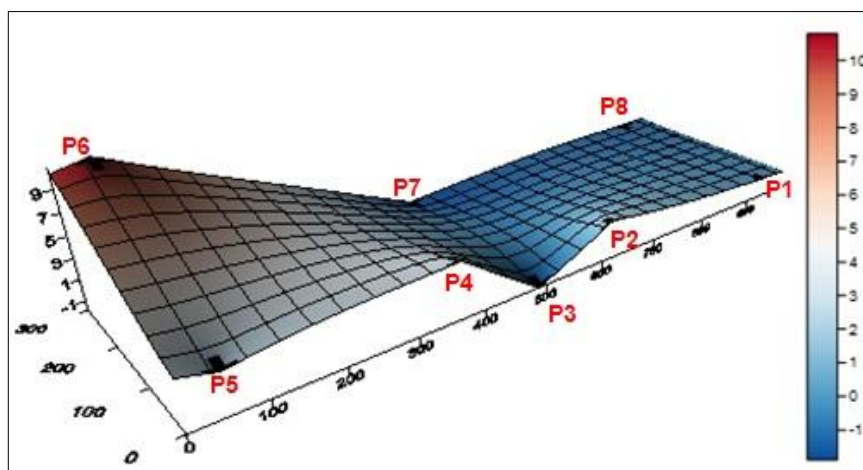


FIGURA 64 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 4: ESTADO ESTÁTICO (PRIMEIRA FASE)
 FONTE: O autor (2012).

Observa-se na segunda fase (FIGURA 65), que o corpo de prova apresentou maior deslocamento próximo à carga aplicada (pontos P2, P3, P4 e P7) e menores deslocamentos em direção aos apoios (pontos P1, P5, P6 e P8). O ponto P3 apresentou maior deslocamento, aproximadamente -19,80 mm. Já o ponto P1 apresentou um deslocamento de apenas -0,86 mm. No ponto P6 ocorreu um deslocamento vertical para cima de aproximadamente 1,14 mm.

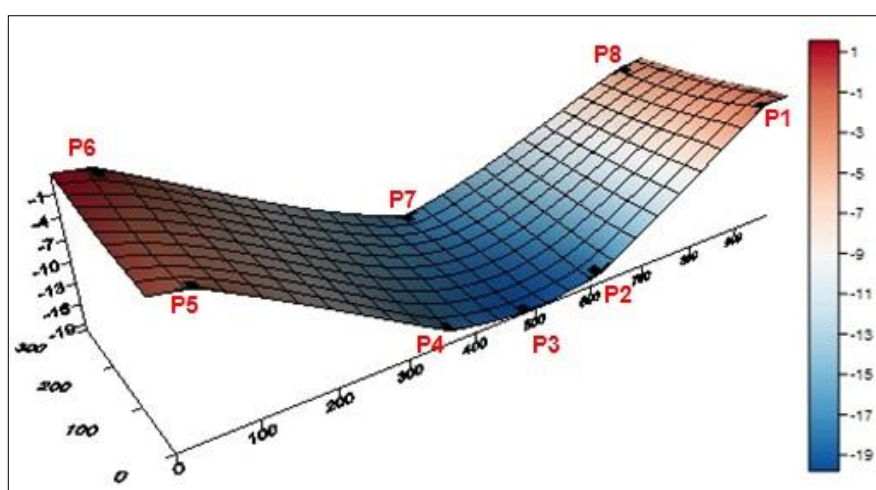


FIGURA 65 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 4: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE)
 FONTE: O autor (2012).

A FIGURA (66) mostra os isodeslocamentos do painel multilaminado quando submetido ao primeiro carregamento. Os dados utilizados nesta modelagem encontram-se no QUADRO (28).

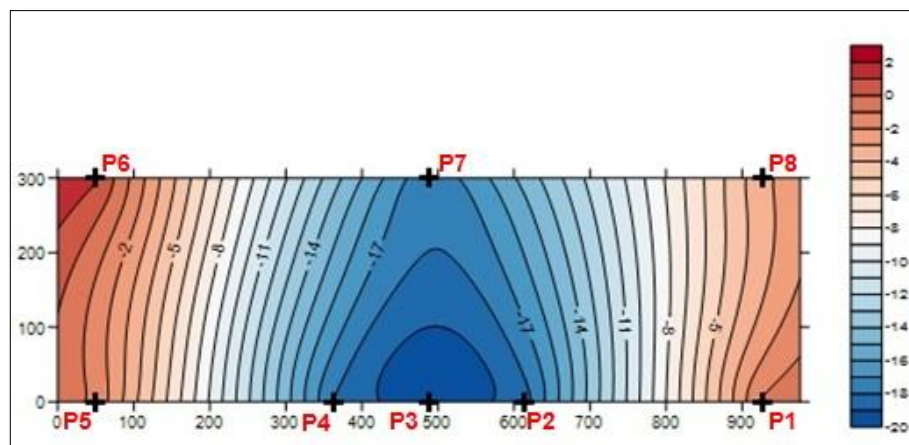


FIGURA 66 - ISODESLOCAMENTOS DO CORPO DE PROVA 4: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE)
FONTE: O autor (2012).

PONTOS	DESLOCAMENTO (mm)
P1	-0,8570
P2	-18,4620
P3	-19,8028
P4	-18,0704
P5	-1,2255
P6	1,1374
P7	-17,8316
P8	-3,2544

QUADRO 28 - DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA SEGUNDA FASE
FONTE: O autor (2012).

Os deslocamentos observados nesta segunda fase (FIGURA 67) foram obtidos comparando-se com o corpo de prova na primeira fase (estático). Os pontos situados mais ao centro do corpo de prova continuaram deslocando em maior proporção do que os pontos situados nas extremidades do painel. Nenhum ponto nesta fase apresentou deslocamento vertical para cima. O ponto P1 apresentou menor deslocamento, aproximadamente -2,66 mm.

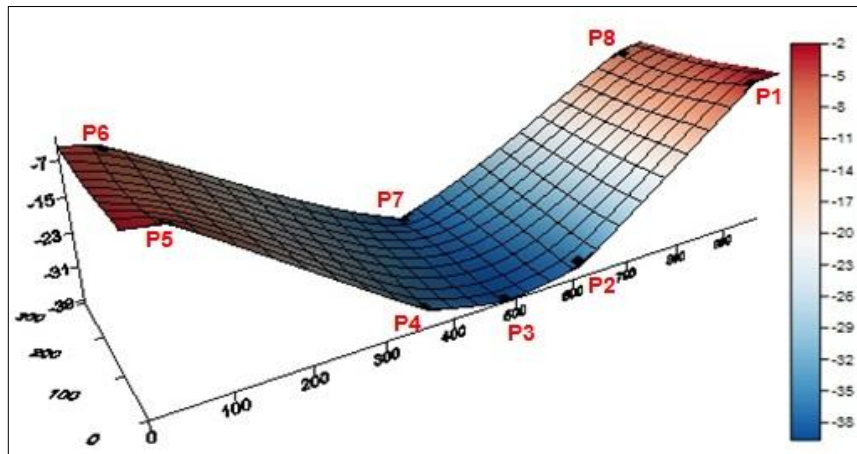


FIGURA 67 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 4: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE)
 FONTE: O autor (2012).

A FIGURA (68) mostra os isodeslocamentos do painel multilaminado quando submetido ao segundo carregamento. Os dados utilizados nesta modelagem encontram-se no QUADRO (29).

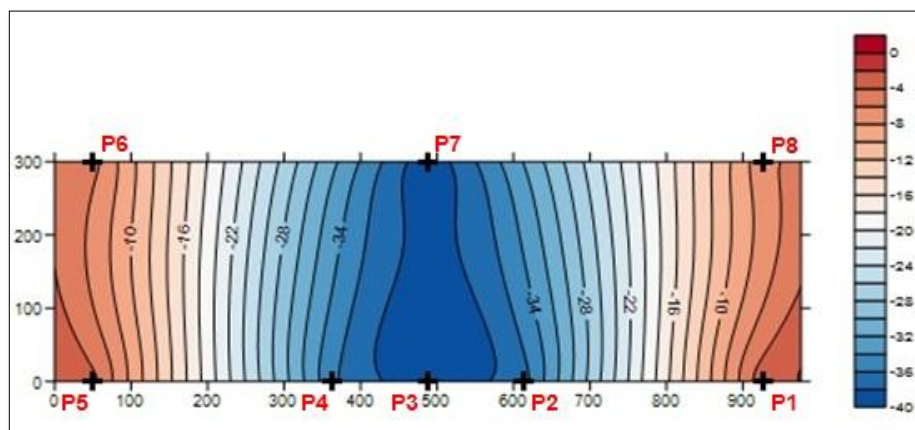


FIGURA 68 - ISODESLOCAMENTOS DO CORPO DE PROVA 4: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE)
 FONTE: O autor (2012).

PONTOS	DESLOCAMENTO (mm)
P1	-2,6559
P2	-36,7467
P3	-39,6711
P4	-35,6406
P5	-3,4193
P6	-5,3693
P7	-39,4550
P8	-6,7031

QUADRO 29 - DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA TERCEIRA FASE
 FONTE: O autor (2012).

4.2.4.5 Corpo de prova 5

A FIGURA (69) apresenta a modelagem tridimensional do corpo de prova não submetido à aplicação de carga (primeira fase). Nota-se que o painel não se apresenta perfeitamente horizontal no início do ensaio. Observa-se que os pontos P5 e P6 (lado esquerdo do painel) possuem uma diferença de aproximadamente 11,24 mm. Já os pontos simétricos, pontos P1 e P8 (lado direito do painel), apresentam uma diferença menor, aproximadamente 1,85 mm. Importante salientar o vão central do corpo de prova: pontos P2, P3 e P4 (pontos utilizados para o cálculo de deslocamento), encontram-se desnivelados. Do ponto P2 para o P3 tem-se um desnível de aproximadamente de 5,20 mm, e do ponto P3 para o P4, aproximadamente 6,67 mm.

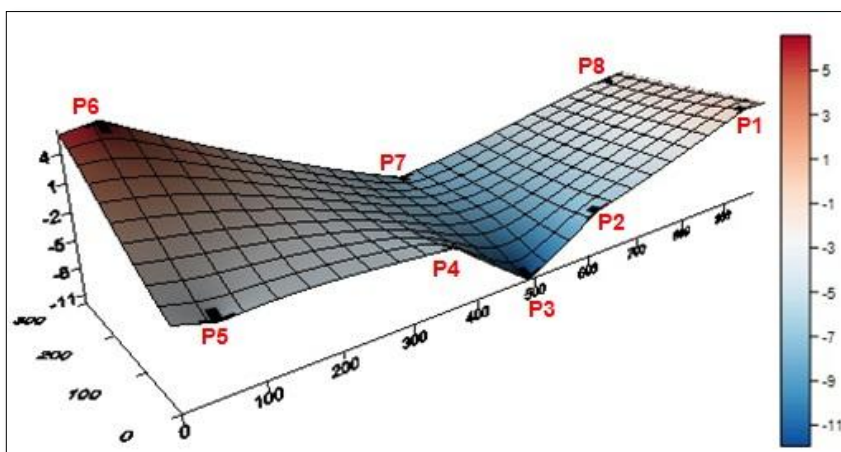


FIGURA 69 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 5: ESTADO ESTÁTICO (PRIMEIRA FASE)
 FONTE: O autor (2012).

Observa-se na segunda fase (FIGURA 70), que o corpo de prova apresentou maior deslocamento próximo à carga aplicada (pontos P2, P3, P4 e P7) e menores deslocamentos em direção aos apoios (pontos P1, P5, P6 e P8). Além disso, o ponto P6 teve um deslocamento vertical para cima de aproximadamente 1,74 mm. Os maiores deslocamentos observados foram de -19,47 mm para o ponto P7 e -18,73 mm para o ponto P3 (pontos simétricos no painel).

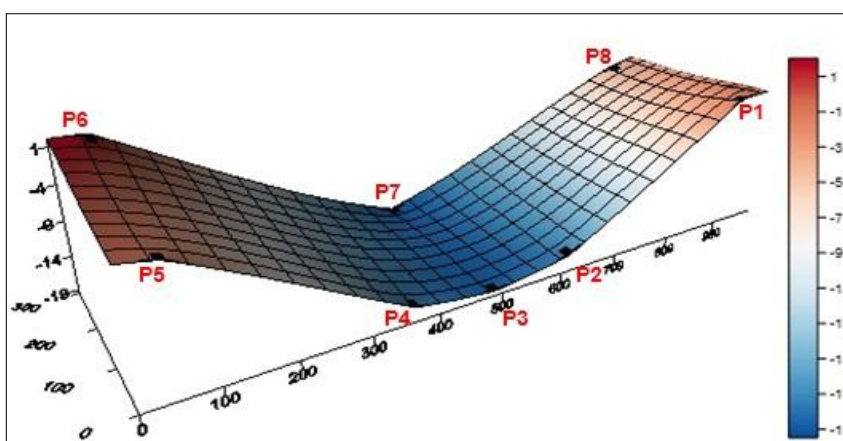


FIGURA 70 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 5: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE)
 FONTE: O autor (2012).

A FIGURA (71) mostra os isodeslocamentos do painel multilaminado quando submetido ao primeiro carregamento. Os dados utilizados nesta modelagem encontram-se no QUADRO (30).

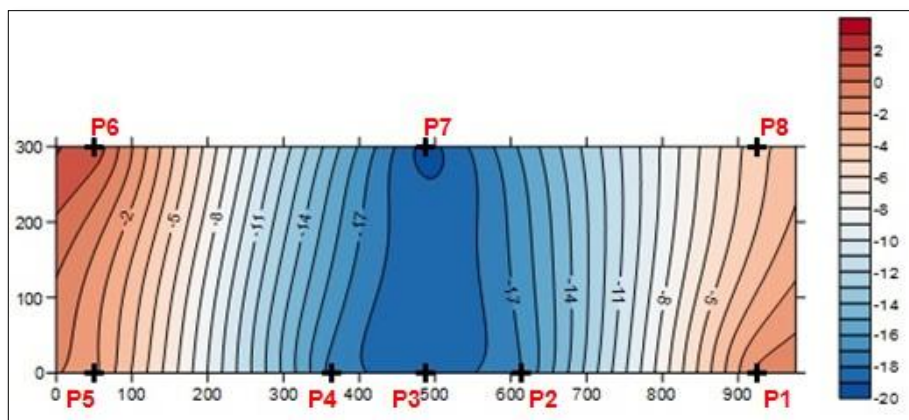


FIGURA 71 - ISODESLOCAMENTOS DO CORPO DE PROVA 5: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE)

FONTE: O autor (2012).

PONTOS	DESLOCAMENTO (mm)
P1	-0,6909
P2	-17,0622
P3	-18,7313
P4	-17,3650
P5	-1,7468
P6	1,7421
P7	-19,4713
P8	-4,3119

QUADRO 30 - DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA SEGUNDA FASE

FONTE: O autor (2012).

Os deslocamentos observados na terceira fase (FIGURA 72) foram obtidos comparando-se com o corpo de prova na primeira fase (estático). Os pontos situados mais ao centro do corpo de prova continuaram deslocando em maior proporção do que os pontos situados nas extremidades do painel. O ponto P6 continuou tendo um deslocamento vertical para cima, sendo que nesta fase

apresentou aproximadamente 2,99 mm. Entretanto, o ponto P5 apresentou menor deslocamento nesta fase, aproximadamente -2,19 mm.

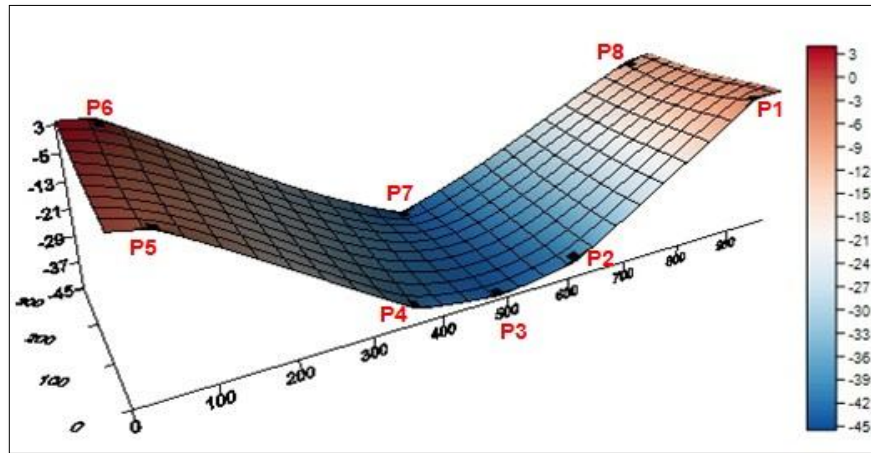


FIGURA 72 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 5: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE)
FONTE: O autor (2012).

Observa-se na FIGURA (73), o mesmo modelo apresentado anteriormente na forma de isodeslocamentos, onde evidenciam-se os deslocamentos superficiais do corpo de prova.

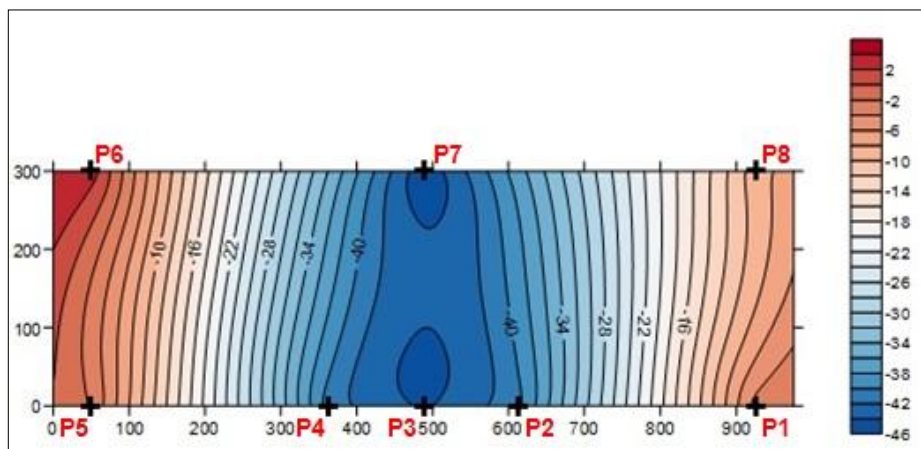


FIGURA 73 - ISODESLOCAMENTOS DO CORPO DE PROVA 5: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE)
FONTE: O autor (2012).

PONTOS	DESLOCAMENTO (mm)
P1	-3,2339
P2	-40,4885
P3	-44,2403
P4	-40,9656
P5	-2,1892
P6	2,9938
P7	-45,5008
P8	-8,8255

QUADRO 31 - DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA TERCEIRA FASE
 FONTE: O autor (2012).

4.2.4.6 Corpo de prova 6

A FIGURA (74) apresenta a modelagem tridimensional do corpo de prova não submetido à aplicação de carga (primeira fase). Nota-se que o painel não se apresenta perfeitamente horizontal no início do ensaio. Observa-se que os pontos P5 e P6 (lado esquerdo do painel) possuem uma diferença de aproximadamente 3,97 mm. Já os pontos simétricos, pontos P1 e P8 (lado direito do painel), apresentam uma diferença menor, 2,90 mm. Importante salientar o vão central do corpo de prova: pontos P2, P3 e P4 (pontos utilizados para o cálculo de deslocamento), encontram-se desnivelados. Do ponto P2 para o P3 tem-se um desnível de aproximadamente de 10,00 mm, e do ponto P3 para o P4, aproximadamente 1,32 mm.

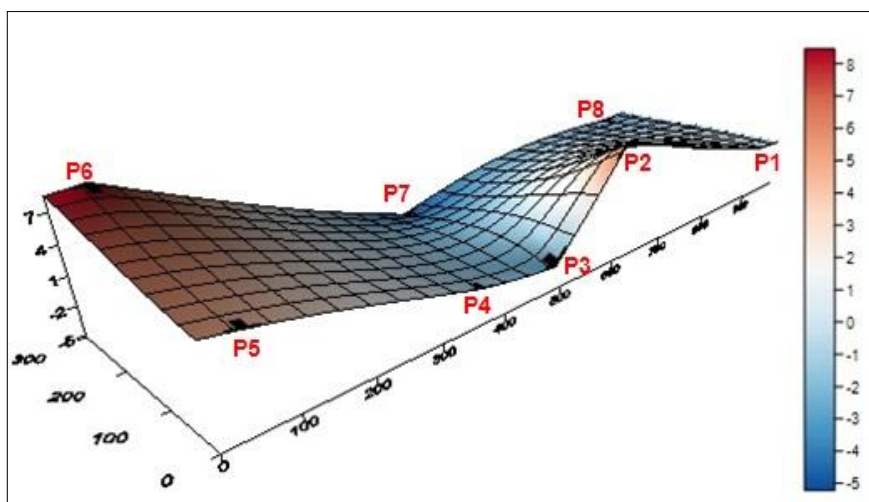


FIGURA 74 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 6: ESTADO ESTÁTICO (PRIMEIRA FASE)
 FONTE: O autor (2012).

Observa-se na segunda fase (FIGURA 75), que o corpo de prova apresentou maior deslocamento próximo à carga aplicada (pontos P2, P3, P4 e P7) e menores deslocamentos em direção aos apoios (pontos P1, P5, P6 e P8). Além disso, o ponto P6 teve um deslocamento vertical para cima de aproximadamente 0,61 mm. Os maiores deslocamentos observados foram de $-19,40$ mm para o ponto P3 e $-18,98$ mm para o ponto P7 (pontos simétricos no painel).

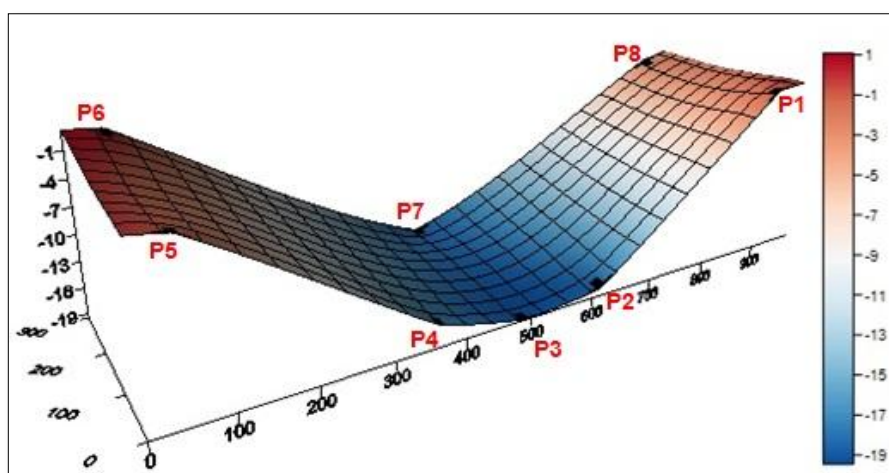


FIGURA 75 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 6: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE)
 FONTE: O autor (2012).

A FIGURA (76) mostra os isodeslocamentos do painel multilaminado quando submetido ao primeiro carregamento. Os dados utilizados nesta modelagem encontram-se no QUADRO (32).

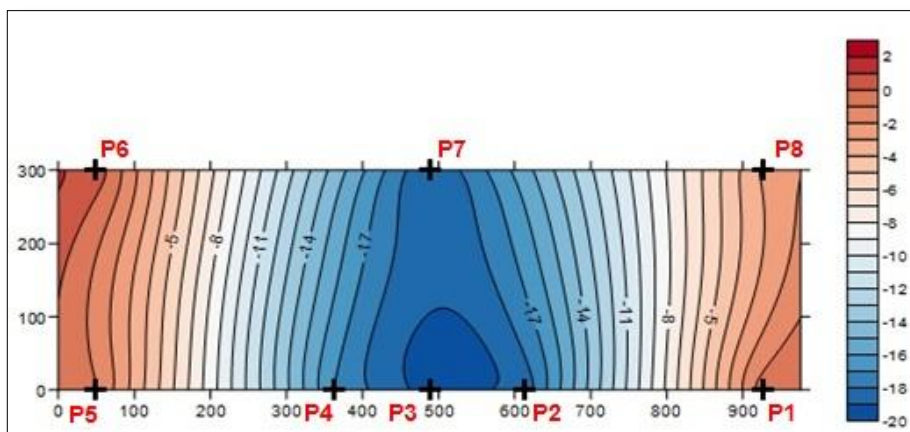


FIGURA 76 - ISODESLOCAMENTOS DO CORPO DE PROVA 6: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE)

FONTE: O autor (2012).

PONTOS	DESLOCAMENTO (mm)
P1	-0,4554
P2	-18,6108
P3	-19,3985
P4	-17,0551
P5	-0,9101
P6	0,6095
P7	-18,9847
P8	-2,8412

QUADRO 32 - DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA SEGUNDA FASE

FONTE: O autor (2012).

Os deslocamentos observados na terceira fase (FIGURA 77) foram obtidos comparando-se com o corpo de prova na primeira fase (estático). Os pontos situados mais ao centro do corpo de prova continuaram deslocando em maior proporção do que os pontos situados nas extremidades do painel. O ponto P6 nesta fase apresentou deslocamento vertical para baixo de aproximadamente -0,67 mm, contrário ao comportamento apresentado na fase anterior.

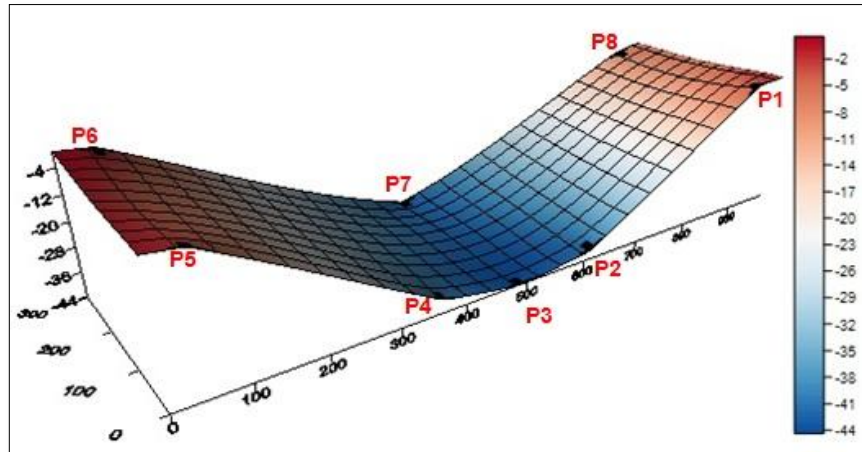


FIGURA 77 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 6: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE)
 FONTE: O autor (2012).

Observa-se na FIGURA (78), o mesmo modelo apresentado anteriormente na forma de isodeslocamentos, onde evidenciam-se os deslocamentos superficiais do corpo de prova.

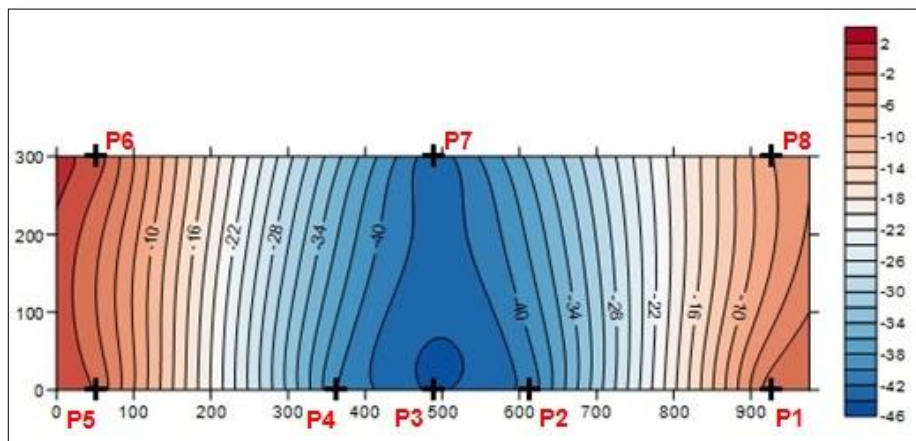


FIGURA 78 - ISODESLOCAMENTOS DO CORPO DE PROVA 6: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE)
 FONTE: O autor (2012).

PONTOS	DESLOCAMENTO (mm)
P1	-2,7067
P2	-41,3945
P3	-44,3412
P4	-40,0685
P5	-2,0947
P6	-0,6677
P7	-43,3899
P8	-8,1100

QUADRO 33 - DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA TERCEIRA FASE
 FONTE: O autor (2012).

4.2.4.7 Corpo de prova 7

A FIGURA (79) apresenta a modelagem tridimensional do corpo de prova não submetido à aplicação de carga (primeira fase). Nota-se que o painel não se apresenta perfeitamente horizontal no início do ensaio. Observa-se que os pontos P5 e P6 (lado esquerdo do painel) possuem uma diferença de aproximadamente 5,26 mm. Já os pontos simétricos, pontos P1 e P8 (lado direito do painel), apresentam uma diferença de apenas 1,47 mm. Importante salientar o vão central do corpo de prova: pontos P2, P3 e P4 (pontos utilizados para o cálculo de deslocamento), encontram-se desnivelados. Esse desnível torna-se mais relevante do ponto P3 para o ponto P4, aproximadamente 5,86 mm.

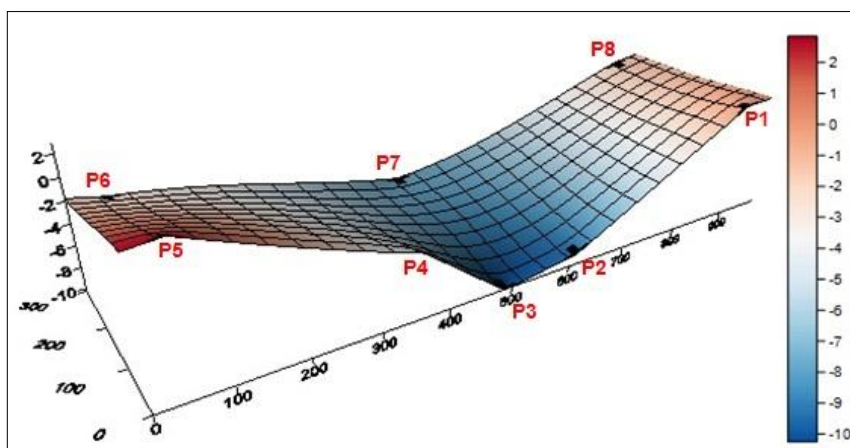


FIGURA 79 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 7: ESTADO ESTÁTICO (PRIMEIRA FASE)
 FONTE: O autor (2012).

Observa-se na segunda fase (FIGURA 80), que o corpo de prova apresentou maior deslocamento próximo à carga aplicada (pontos P2, P3, P4 e P7) e menores deslocamentos em direção aos apoios (pontos P1, P5, P6 e P8). Além disso, o ponto P6 teve um deslocamento vertical para cima de aproximadamente 2,09 mm. Os maiores deslocamentos observados foram de -18,69 mm para o ponto P3 e -18,23 mm para o ponto P7 (pontos simétricos no painel).

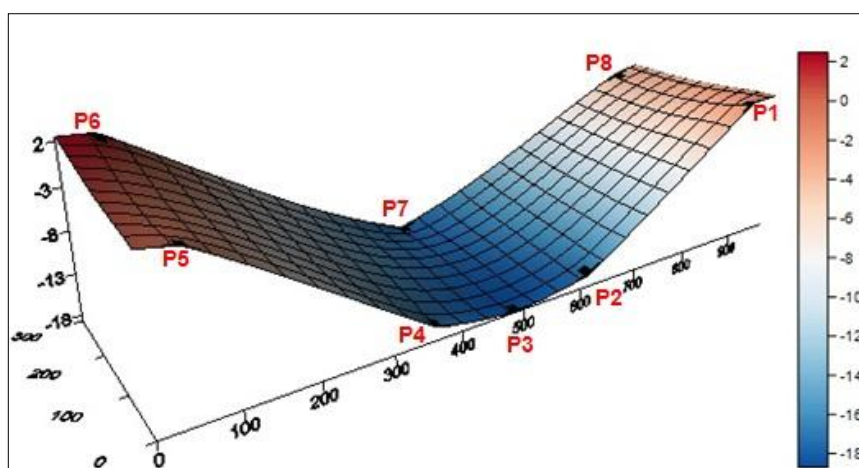


FIGURA 80 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 7: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE)
 FONTE: O autor (2012).

A FIGURA (81) mostra os isodeslocamentos do painel multilaminado quando submetido ao primeiro carregamento. Os dados utilizados nesta modelagem encontram-se no QUADRO (34).

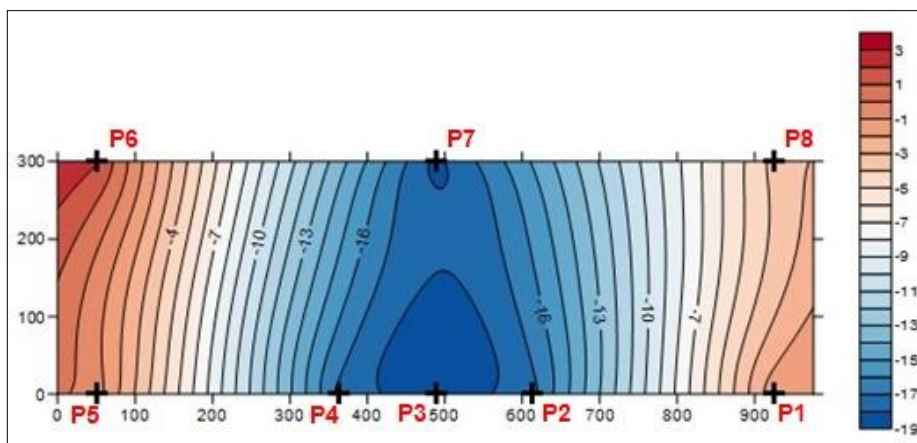


FIGURA 81 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 7: PRIMEIRA PARADA (SEGUNDA FASE)
FONTE: O autor (2012).

PONTOS	DESLOCAMENTO (mm)
P1	-1,2809
P2	-17,2889
P3	-18,6911
P4	-17,2551
P5	-0,5612
P6	2,0937
P7	-18,2312
P8	-3,6490

QUADRO 34 - DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA SEGUNDA FASE
FONTE: O autor (2012).

Os deslocamentos observados na terceira fase (FIGURA 82) foram obtidos comparando-se com o corpo de prova na primeira fase (estático). Os pontos situados mais ao centro do corpo de prova continuaram deslocando em maior proporção do que os pontos situados nas extremidades do painel. O ponto P6, como também ocorreu na fase anterior, apresentou um deslocamento vertical para cima,

neste caso de aproximadamente 5,53 mm. O ponto P5 apresentou menor deslocamento, aproximadamente -1,29 mm.

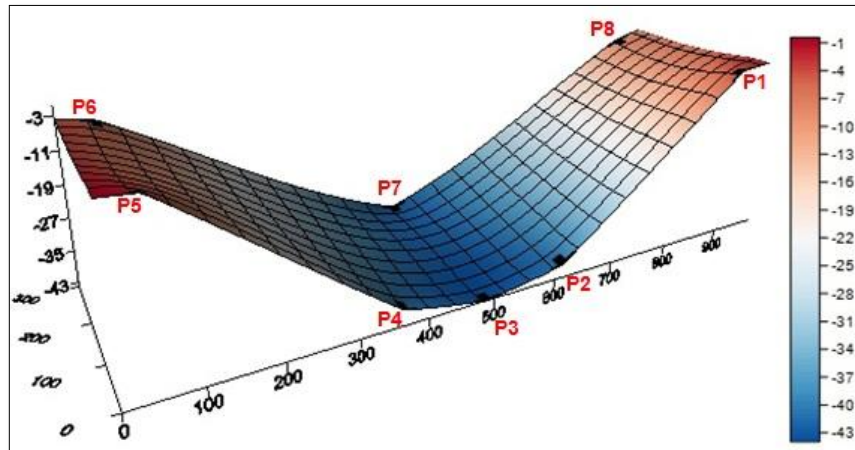


FIGURA 82 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA 7: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE)
FONTE: O autor (2012).

Observa-se na FIGURA (83), o mesmo modelo apresentado anteriormente na forma de isodeslocamentos, onde evidenciam-se os deslocamentos superficiais do corpo de prova.

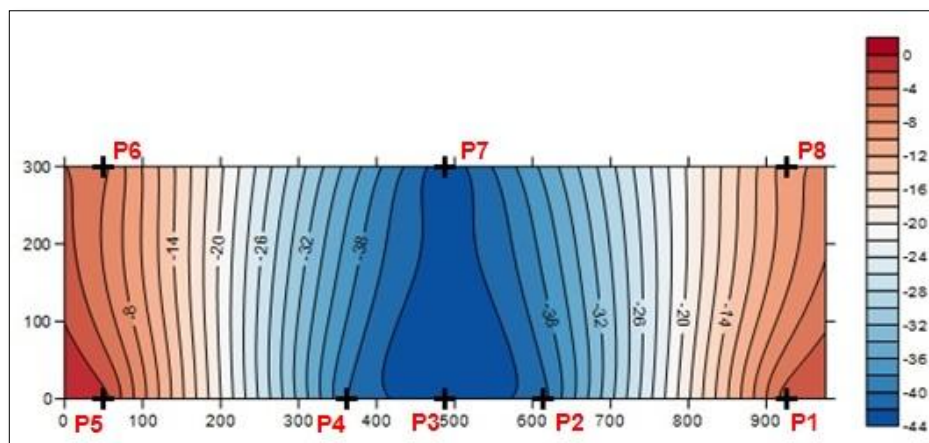


FIGURA 83 - ISODESLOCAMENTOS DO CORPO DE PROVA 7: SEGUNDA PARADA (TERCEIRA FASE)
FONTE: O autor (2012).

PONTOS	DESLOCAMENTO (mm)
P1	-2,8621
P2	-40,7674
P3	-43,8863
P4	-40,1472
P5	-1,2927
P6	5,5336
P7	-43,3625
P8	-8,9210

QUADRO 35 - DESLOCAMENTO DOS PONTOS MONITORADOS NA TERCEIRA FASE
 FONTE: O autor (2012).

Todos os corpos de prova testados foram levados até a ruptura. As FIGURAS (84), (85) e (86) ilustram alguns destes.



FIGURA 84 - ASPECTO DE UM CORPO DE PROVA LEVADO À RUPTURA
 FONTE: O autor (2012).



FIGURA 85 - ASPECTO DE UM CORPO DE PROVA LEVADO À RUPTURA
FONTE: O autor (2012).



FIGURA 86 - ASPECTOS DOS CORPOS DE PROVA LEVADOS À RUPTURA
FONTE: O autor (2012).

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A avaliação dos adesivos refletores juntamente com a estação total para monitorar os pontos nos corpos de prova mostrou-se satisfatória nos dois primeiros experimentos. No primeiro experimento, onde as visadas realizadas eram perpendiculares, obteve-se resposta a refletividade dos adesivos refletores com variações, entre as mensurações da estação total com as do paquímetro, no décimo do milímetro. De acordo com a análise estatística realizada, os valores médios das distâncias obtidas com a estação total e com o paquímetro não diferiram.

Na realização do segundo experimento com visadas oblíquas (30°, 45° e 60°) nos alvos refletores, a estação total não obteve resposta das leituras. Entretanto, entre os anteparos testados, somente com as abraçadeiras de aço obtiveram-se leituras normalmente, devido às diferenças no ângulo de incidência das visadas. Através da utilização das abraçadeiras de aço foi possível manuseá-las de forma a disporem os adesivos refletores em diferentes inclinações em relação à linha de visada, independente da posição da viga de madeira. Nos pontos monitorados com as abraçadeiras de aço observou-se entre as séries de observações que, um deslocamento monitorado nestas circunstâncias pode ter um desvio padrão de até $\pm 0,5$ mm.

A análise entre os resultados do método de irradiação e do ensaio de flexão estática pôde ser realizada comparando-se as flechas e o módulo de elasticidade, obtidos a partir de ambos os métodos. Avaliando-se os resultados das flechas, notou-se que, as diferenças entre as flechas para os métodos não foram significativas, a ponto de interferir numa média de 1,56% no resultado da flecha admissível para o tipo de corpo de prova testado. Estatisticamente comprovou-se que as flechas obtidas em ambos os métodos (ensaio de flexão estática e método de irradiação) não diferem. Desta forma, não interferindo nos resultados de resistência dos corpos de prova.

Na avaliação das comparações dos módulos de elasticidade entre os métodos, notou-se que, apresentaram uma média de 0,67% de diferença na carga máxima admissível. Essa diferença, por ser irrelevante em relação à carga máxima

admissível, não acarreta alterações na análise de resistência para os painéis multilaminados analisados. Estatisticamente comprovou-se que, os valores médios dos módulos de elasticidade obtidos com o ensaio de flexão estática e com o método de irradiação não diferem.

A avaliação do comportamento tridimensional, ilustradas neste trabalho, evidencia a importância do monitoramento ao longo dos ensaios, visto que, mostra claramente como o corpo de prova reage durante o experimento. Notou-se que todos os corpos de prova testados apresentaram na primeira fase (estático) defeitos no que diz respeito a sua planura e sua colocação perfeitamente horizontal na máquina de ensaios. Apesar de esperar-se das equações da mecânica que as extremidades do painel apresentassem um comportamento linear, observou-se que, durante os ensaios os corpos de prova buscam uma adaptação na distribuição das cargas. Este comportamento, até então, não mensurado nos ensaios tradicionais da área madeireira, trouxe novas possibilidades de avaliações aos corpos de prova durante os ensaios.

Desta forma, pôde-se confirmar que o método de irradiação tridimensional apresenta-se como uma nova proposta de verificação de deslocamentos para ensaios estruturais de madeira, incorporando ainda, uma análise tridimensional do comportamento de cada corpo de prova durante o ensaio estrutural. Como também, pode-se ainda, empregar essa metodologia durante o desenvolvimento da construção de uma estrutura de madeira (por exemplo, uma ponte), como também, após o término da mesma. Desta forma, detectando o comportamento tridimensional de cada elemento estrutural no decorrer da construção.

Recomenda-se desta forma, a aplicação de outros métodos geodésicos a diferentes ensaios estruturais de madeira, trabalhando-se, por exemplo, com outros corpos de prova. Verificando assim, se outros métodos ou até, outros equipamentos geodésicos podem obter resultados para comparação com os ensaios estruturais, ou ainda, obtendo deslocamentos em pontos dos corpos de prova que ainda não são possíveis de mensurar nos ensaios tradicionais da área madeireira. Assim, contribuindo tanto para pesquisas e estudos voltados ao monitoramento de estruturas de madeira com aplicação de métodos geodésicos, como também, voltados à análise estrutural de diferentes corpos de prova para a área Florestal.

REFERÊNCIAS

ALBA, M. et al. **Structural monitoring of a large dam by terrestrial laser scanning**. Journal International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2006.

ASSAN, A. E. **Resistência dos materiais**. Campinas, São Paulo: Editora Unicamp, 2010. v.1.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE - ABIMCI. **Painéis de madeira fabricados no Brasil e suas particularidades**. Curitiba, 2009. Disponível em: <http://www.abimci.com.br/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=31&Itemid=37>. Acesso em: 28/9/2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO – ABENDI. **Ensaio não destrutivo – END**. São Paulo – SP, 2011. Disponível em: <http://www.abende.org.br/info_end_oquesao.php?w=1280&h=720>. Acesso em: 28/9/2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13133**: execução de levantamento topográfico. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: ações e segurança nas estruturas – procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Mercado de produtos florestais**: madeira em tora. Brasil, 2011. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF10-BR/capitulo03.pdf>>. Acesso em: 26/9/2011.

BORTOLETTO JR, G.; GARCIA, J. N. **Propriedades de resistência e rigidez à flexão estática de painéis OSB e compensados**. Sociedade de Investigações Florestais, Revista Árvore, Viçosa – MG, 2004. v. 28, n. 4, p. 563-570.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. Livraria Nobel S. A., 1991. 154p.

CHEN, Y. Q. **Analysis of deformation surveys**: a generalized method. 262 f. Thesis (Ph.D) - Department of Surveying Engineering Technical, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1983.

CHEN, Y. Q.; CHRZANOWSKI, A. **An overview of the physical interpretation of deformation measurements**. In: Deformation Measurements Workshop. MIT, Cambridge, 1986.

CUNHA, A. B. da. **Produção de vigas estruturais de madeira avaliadas por meio de ensaios estáticos e dinâmicos**. 146 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

DALMOLIN, Quintino. **Ajustamento por mínimos quadrados**. 3. ed. revisada. Curitiba, 2010.

DEPARTMENT OF THE ARMY. **Structural deformation surveying**. U.S. Army Corps of engineers, Washington, DC, 2002.

EQUIPAMENTOS E SISTEMAS DE ENSAIOS Ltda – EMIC. Disponível em: <<http://www.emic.com.br/>>. Acesso em: 29/9/2011.

ESPARTEL, L. **Curso de topografia**. 9. ed. Rio de Janeiro: Globo, 1987. 655p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – CEN. **EN 789**: estruturas de madeira – métodos de teste – determinação das propriedades mecânicas de painéis derivados de madeira, *Brussels*, 2004.

FEIO, A.; LOURENÇO, P. B. **Possibilidades e aplicações de ensaios não destrutivos**. In: Encontro sobre a madeira e suas aplicações nobres – bem utilizar a madeira. Portugal, 2005.

FERREIRA, D. **Ponte estaiada Octavio Frias de Oliveira**. 2007. (52 fotografias), várias dimensões. Disponível em: <<http://cenasdacidade.wordpress.com/2007/10/29/primeiro-post-ponte-estaiada-na-av-roberto-marinho/>>. Acesso em: 7/9/2011.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook:** wood as engineering material. Madison, USA, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. 463p.

GEMAEL, Camil. **Introdução ao ajustamento de observações:** aplicações geodésicas. Curitiba: UFPR, 1994.

GOGLE EARTH. Disponível em: <<http://www.google.com/earth/index.html>>. Acesso em: 8/9/2011.

GOMES, J. P. **Determinação de desníveis de precisão utilizando estação total.** 106 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

GORDON, S. et al. **Application of a high-resolution, ground-based laser scanner for deformation measurements.** In: FIG International Symposium on Deformation Measurements, 10th, Orange, California, USA, 2001. p.23-32.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais.** 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Sistema nacional de pesquisas de custos e índices da construção civil:** contas nacionais trimestrais – indicadores de volume. mar. 2011. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1830&id_pagina=1>. Acesso: 03/09/2011.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída.** FUPEF, Curitiba, 2005. 247 p.

JEKELI, C. **Geometric reference systems in geodesy.** Division of Geodesy and Geospatial Science School of Earth Sciences, Ohio State University, 2006.

KAHMEN, H.; FAIG, W. **Surveying.** New York: Editora de Gruynter, 1988. 578p.

KRELLING, P. C. L. **Concepção de um inclinômetro foto-mecânico para controle geodésico de estruturas.** 193 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

LAMBROU, E.; PANTAZIS, G. **A new geodetic methodology for the accurate documentation and monitoring of inaccessible surfaces**. In: FIG International Symposium on Deformation Measurements, 12th, Baden, Austria, 2006.

LEICA GEOSYSTEMS. **TPS – system 1000 programs**: User's manual. Version 2.2. Switzerland, 1998.

LEICA GEOSYSTEMS. **TPS – system 1000 programs**: User's manual. Version 2.4. Switzerland, 2006.

LUTES, J. A. **Automated dam displacement monitoring using a robotic total station**. 138 f. M.Sc.E. Thesis – Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 2002.

MARTINI, L. **Calibração de prismas de reflexão total em forma de fita adesiva, em acrílico e sua aplicação no controle de deslocamentos de estruturas**. 99 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MARTINS, T. F. R. M. **Dimensionamento de estruturas de madeira**. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2010.

MENDES, L. M. ***Pinus spp.* na produção de painéis de partículas orientadas (OSB)**. 156 f. Tese (Doutorado) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

MORRIS, D. H. et al. **Mecânica dos materiais**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1999.

NADAL, C. A. **Método da interseção óptica tridimensional aplicado à engenharia de precisão**. 116 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

NADAL, C. A. **Sistema de referência e tempo em geodésia**. Apostila da disciplina de Sistemas de Referência e Tempo. Departamento de Geomática – Setor de Ciências da Terra, Curso de Engenharia Cartográfica, Universidade Federal do Paraná, 2008. 106 p.

NADAL, M. A. D. **Controle e operação remota de estações totais robotizadas voltado à auscultação geodésica**. 132 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

NEVES, R. V. **Processamento e análise de levantamentos geodésicos aplicado ao monitoramento de estruturas civis**. 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

PACILÉO NETTO, N. et al. **Monitoramento de deslocamentos em estruturas com GPS**. Assembléia luso – espanhola de geodésia e geofísica, 3ª, Valência, Espanha, 2002.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. 6. ed., rev. e ampl., [reimpr.], Rio de Janeiro: LTC, 2008.

PRATA, J. G. **Desempenho de um sistema de qualidade em uma fábrica de painéis compensados**. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

PRATA, J. G. **Estudo da viabilidade tecnológica do uso de espécies de pinus tropicais para produção de painéis colados lateralmente (*edge glued panels* – EGP)**. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

REVISTA DA MADEIRA. **Compensado**. 2009. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/madeira_paineis.php?num=6&title=Compensado >. Acesso em: 19/6/2011.

RÜEGER, J. M. **Electronic distance measurement: an introduction**. 3. ed. Berlin: Springer – Verlag, 1996.

SECORD, J. M. **Development of the automatic data management and the analysis of integrated deformation measurements**. 237 f. Ph.D. dissertation - Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1995.

SILVA, A. G. de O. et al. Métodos de levantamentos topográficos planimétricos para o georreferenciamento de imóveis rurais. In: Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 1º, 2006, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: Embrapa Informática Agropecuária/INPE, 2006. p. 939-948.

SZÜCS, C. A. et al. **Estruturas de madeira**. Material didático. Centro Tecnológico - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008. 199 p.

TARGA, L. A. *et al.* Avaliação no módulo de elasticidade de madeira com uso de método não destrutivo de vibração transversal. **Scientific electronic library online**, Jaboticabal, v.25, n.2, p. 291-299, maio/ago 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v25n2/26490.pdf>>. Acesso em: 28/9/11.

THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION – APA. **Technical note**: load span tables for APA structural use panels. 2001.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Structural deformation surveying**. Department of the Army, Washington, DC, 2002

VEIGA, L. A. K. *et al.* **Fundamentos de topografia**. Apostila da disciplina de Topografia. Departamento de Geomática – Setor de Ciências da Terra, Curso de Engenharia Cartográfica, Universidade Federal do Paraná, 2007. 195 p.

ZENID, G. J. **Madeira**: uso sustentável na construção civil. 2. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas: SVMA, 2009. 99 p.

ZOCOLOTTI FILHO, C. A. **Utilização de técnicas de poligonação de precisão para o monitoramento de pontos localizados em galerias de inspeção: estudo de caso de U.H. de Salto Caxias**. 101 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

ANEXOS

ANEXO 1 – COORDENADAS DO CORPO DE PROVA 1

CORPO DE PROVA 1				
MOMENTO	PONTOS	COORDENADAS (mm)		
		X	Y	Z
SEM CARGA	P1	0,00	0,00	0,00
	P2	340,84	-9,14	-5,20
	P3	375,94	8,18	0,08
	P4	551,23	-7,99	-4,31
	P5	861,46	0,00	-4,11
	P6	847,49	331,68	-29,51
	P7	420,26	324,62	-3,56
	P8	-5,95	332,36	1,64
1º PARADA	P1	-0,33	-0,03	0,34
	P2	344,03	-9,29	12,44
	P3	376,56	8,19	19,44
	P4	551,05	-7,98	13,42
	P5	858,10	-0,02	28,26
	P6	842,29	331,85	-27,51
	P7	420,69	324,50	17,15
	P8	-2,78	332,09	1,36
2º PARADA	P1	2,03	-0,08	0,35
	P2	347,74	-9,40	35,69
	P3	378,54	8,14	44,38
	P4	552,78	-8,09	35,91
	P5	854,81	-0,05	18,87
	P6	842,30	331,08	-27,08
	P7	419,96	324,63	42,13
	P8	6,93	331,33	-0,01

ANEXO 2 – COORDENADAS DO CORPO DE PROVA 2

CORPO DE PROVA 2				
MOMENTO	PONTOS	COORDENADAS (mm)		
		X	Y	Z
SEM CARGA	P1	0,00	0,00	0,00
	P2	310,57	-6,44	6,40
	P3	384,12	15,19	7,77
	P4	550,52	-9,52	4,06
	P5	860,93	0,00	5,46
	P6	855,56	330,54	10,67
	P7	421,27	331,60	8,45
	P8	-6,21	341,02	8,15
1º PARADA	P1	-0,30	0,03	0,22
	P2	310,96	-6,43	24,10
	P3	378,85	15,25	26,14
	P4	550,90	-9,40	21,56
	P5	861,64	-0,02	4,97
	P6	854,12	330,39	10,70
	P7	421,30	331,74	27,15
	P8	-2,72	340,96	7,89
2º PARADA	P1	4,39	0,02	4,20
	P2	311,37	-6,37	46,68
	P3	376,08	15,45	50,68
	P4	551,06	-9,24	44,12
	P5	860,98	0,24	4,28
	P6	851,32	330,53	11,20
	P7	420,60	332,00	50,05
	P8	2,31	340,97	7,64

ANEXO 3 – COORDENADAS DO CORPO DE PROVA 3

CORPO DE PROVA 3				
MOMENTO	PONTOS	COORDENADAS (mm)		
		X	Y	Z
SEM CARGA	P1	0,00	0,00	0,00
	P2	321,15	-7,38	1,90
	P3	384,67	12,43	11,23
	P4	555,72	-13,02	7,99
	P5	862,23	0,00	-2,47
	P6	860,83	339,95	0,04
	P7	424,97	351,74	8,64
	P8	-0,93	338,15	5,83
1° PARADA	P1	0,99	0,00	0,21
	P2	323,21	-7,37	19,55
	P3	383,80	12,63	30,32
	P4	555,69	-12,95	25,34
	P5	862,57	-0,23	-2,25
	P6	858,81	339,53	-0,30
	P7	425,21	351,86	28,36
	P8	2,86	337,99	5,82
2° PARADA	P1	3,96	0,36	0,29
	P2	325,98	-6,95	42,54
	P3	384,17	13,09	55,32
	P4	556,37	-12,45	48,27
	P5	862,72	-0,10	-1,91
	P6	855,96	339,34	-0,96
	P7	424,37	352,77	53,47
	P8	9,53	338,31	5,83

ANEXO 4 – COORDENADAS DO CORPO DE PROVA 4

CORPO DE PROVA 4				
MOMENTO	PONTOS	COORDENADAS (mm)		
		X	Y	Z
SEM CARGA	P1	0,00	0,00	0,00
	P2	311,16	-5,97	-1,89
	P3	429,37	30,39	1,90
	P4	557,25	-0,48	-3,61
	P5	861,17	0,00	-2,08
	P6	861,61	355,01	-10,83
	P7	426,32	352,13	1,80
	P8	6,19	367,40	1,02
1º PARADA	P1	0,79	-0,15	0,28
	P2	310,90	-5,83	16,57
	P3	429,14	30,52	21,70
	P4	557,53	-0,60	14,46
	P5	861,13	-0,48	-0,95
	P6	860,60	354,63	-11,18
	P7	426,78	352,11	19,63
	P8	9,19	367,70	2,26
2º PARADA	P1	2,62	-0,11	0,44
	P2	307,99	-5,30	34,72
	P3	428,58	30,86	41,26
	P4	557,03	-0,43	32,03
	P5	858,94	-0,73	0,41
	P6	856,25	354,96	-10,46
	P7	426,73	352,35	41,25
	P8	12,28	368,12	3,74

ANEXO 5 – COORDENADAS DO CORPO DE PROVA 5

CORPO DE PROVA 5				
MOMENTO	PONTOS	COORDENADAS (mm)		
		X	Y	Z
SEM CARGA	P1	0,00	0,00	0,00
	P2	306,04	0,56	6,75
	P3	424,04	27,90	11,95
	P4	552,90	-8,85	5,28
	P5	862,92	0,00	4,65
	P6	869,64	349,61	-6,59
	P7	424,25	342,01	7,85
	P8	0,53	367,87	1,85
1º PARADA	P1	0,44	0,02	0,53
	P2	305,38	0,63	23,80
	P3	423,05	27,91	30,66
	P4	551,15	-8,73	22,56
	P5	864,22	-0,75	5,55
	P6	869,58	348,75	-8,11
	P7	425,50	341,49	27,28
	P8	4,84	367,84	1,93
2º PARADA	P1	3,06	-0,04	1,03
	P2	305,61	0,87	47,23
	P3	422,59	28,11	56,17
	P4	550,28	-8,47	46,16
	P5	863,57	-1,09	6,43
	P6	868,30	348,40	-8,99
	P7	426,10	341,51	53,31
	P8	9,33	367,95	2,54

ANEXO 6 – COORDENADAS DO CORPO DE PROVA 6

CORPO DE PROVA 6				
MOMENTO	PONTOS	COORDENADAS (mm)		
		X	Y	Z
SEM CARGA	P1	0,00	0,00	0,00
	P2	339,03	-5,63	-7,26
	P3	393,95	6,83	2,74
	P4	552,93	-3,14	1,42
	P5	863,98	0,00	-4,50
	P6	867,19	361,94	-8,47
	P7	411,13	356,94	5,22
	P8	3,39	376,68	2,90
1° PARADA	P1	0,39	0,07	0,23
	P2	344,14	-5,93	10,63
	P3	397,92	6,48	21,73
	P4	553,77	-3,04	18,45
	P5	863,32	0,08	-3,88
	P6	867,76	361,72	-8,49
	P7	413,36	356,56	24,07
	P8	6,18	376,87	3,42
2° PARADA	P1	2,69	0,05	0,25
	P2	347,70	-6,10	33,21
	P3	401,70	6,18	46,40
	P4	554,32	-2,82	41,46
	P5	862,23	0,14	-3,35
	P6	867,68	361,54	-8,26
	P7	413,83	356,81	48,53
	P8	11,45	376,80	3,87

ANEXO 7 – COORDENADAS DO CORPO DE PROVA 7

CORPO DE PROVA 7				
MOMENTO	PONTOS	COORDENADAS (mm)		
		X	Y	Z
SEM CARGA	P1	0,00	0,00	0,00
	P2	310,95	-0,32	9,29
	P3	422,11	26,42	10,25
	P4	559,74	-3,72	4,40
	P5	866,66	0,00	-2,85
	P6	858,13	342,00	2,40
	P7	423,32	355,54	7,79
	P8	-2,96	357,46	1,47
1° PARADA	P1	1,24	0,12	0,29
	P2	310,93	-0,20	26,58
	P3	422,58	26,67	28,94
	P4	559,63	-3,61	21,65
	P5	867,16	-0,23	-2,75
	P6	856,08	341,60	2,22
	P7	423,50	355,92	26,01
	P8	0,21	358,01	3,19
2° PARADA	P1	2,63	0,08	1,12
	P2	309,62	-0,08	50,03
	P3	422,13	26,68	54,14
	P4	558,44	-3,55	44,53
	P5	866,84	-0,76	-1,83
	P6	852,99	340,28	1,27
	P7	423,52	355,88	51,15
	P8	5,56	357,98	4,05